



Etude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées dans la retenue du Chambon (vallée de la Romanche - Isère) après 45 ans d'exploitation.

Laurent Sikirdji

► To cite this version:

Laurent Sikirdji. Etude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées dans la retenue du Chambon (vallée de la Romanche - Isère) après 45 ans d'exploitation.. Minéralogie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1982. Français. NNT : . tel-00499438

HAL Id: tel-00499438

<https://theses.hal.science/tel-00499438>

Submitted on 9 Jul 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

(SIKIRDJI (L.))

INSTITUT DE RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES DE GÉOLOGIE ET DE MÉCANIQUE



EX. n° 1

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE 3^e CYCLE DE GÉOLOGIE APPLIQUÉE

par

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GÉOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

Laurent SIKIRDJI

1 JUL. 1982

S U J E T

Etude sédimentologique et géotechnique des alluvions déposées dans la retenue du Chambon (vallée de la Romanche - Isère) après 45 ans d'exploitation.

Soutenue le 28 Juin 1982 devant la Commission d'Examen

M. P. VIALON	Président
M. P. ANTOINE	Rapporteur
M. J. PERRIAUX	Examineurs
M. D. FABRE	
M. J. BERNARD	Invité

A Marion

A Mathieu, Fabien et Julien

A mes parents

AVANT-PROPOS

Au terme de cette étude, je tiens à remercier particulièrement :

- Monsieur VIALON qui m'a fait l'honneur d'accepter la Présidence du Jury de cette thèse.

- Monsieur ANTOINE qui m'a accueilli dans son équipe puis suivi dans l'avancement de mes travaux.

- Monsieur PERRIAUX pour l'enthousiasme qu'il a su me communiquer.

- Monsieur FABRE pour ses conseils et sa participation active sur le terrain.

- Messieurs GIRARD, BERNARD, CASSAZ et BARRES, d'Electricité de France, Groupe Régional de Production Hydraulique "Alpes", pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en acceptant de financer cette étude, et pour les nombreux documents qu'ils ont mis à ma disposition.

- Messieurs MONJUVENT, USELLE et VIVIER pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche.

- Messieurs BIGUENET, BUFFET, GIRAUD et RAYNAUD pour leur contribution à cette étude.

- Monsieur LETOURNEUR qui a apporté une attention toute particulière à la correction de mon manuscrit.

- Madame DOMPMIER, Messieurs DEMANJEON et REVOL pour leur collaboration technique.

Mesdames BLANCHI, ORENGO pour leur participation à mes recherches bibliographiques.

- Mesdemoiselles LAMOTTE, POULINGUE, TIFFINEAU et Madame GUY pour la dactylographie de ce mémoire.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui ont participé aux prélèvements et essais dans la retenue du Chambon.

I N T R O D U C T I O N

A l'origine de cette étude, notre préoccupation était d'une part de comprendre les phénomènes naturels de sédimentation lacustre qui aboutissent à des dépôts finement stratifiés (faciès à lamines) qualifiés de "varves" dans certains cas, et d'autre part de définir des caractéristiques géotechniques de ces dépôts.

En 1981, la vidange totale de la retenue du Chambon, sur la Romanche, nous a offert des conditions d'observation qui ont modifié l'aspect primitif de notre recherche. Nous disposions en effet d'un bassin de sédimentation artificiel, d'un volume initial de $54 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, exploité depuis 45 ans où les dépôts argilo-silteux atteignaient 18 m au pied du barrage. L'étude de cette sédimentation était susceptible de nous fournir en abondance des données relatives à la succession lithologique, à ses rythmes, à sa composition minéralogique et aux propriétés géotechniques des matériaux accumulés.

De plus, ces observations permettaient d'aborder un problème pratique. L'envasement des retenues est un phénomène qui préoccupe les exploitants des barrages, vu la perte économique qui résulte de la diminution de la capacité utile. Si l'on tente de lutter contre cet envasement par des vidanges périodiques, l'amélioration de leur rendement ne peut se fonder que sur une connaissance détaillée des caractéristiques des alluvions et de la dynamique de la sédimentation.

C'est en fonction de ces critères qu'une convention d'étude a été établie entre l'Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique et Electricité de France, Groupe Régional de Production Hydraulique "Alpes". Les objectifs prévus par ce contrat étaient de déterminer le taux d'envasement dans la retenue, d'étudier les processus réagissant le dépôt des sédiments (courants de turbidité) et enfin d'évaluer l'importance des phénomènes de tassement des alluvions.

C'est en fonction de ces considérations qu'apparaissent les divisions successives de ce mémoire :

Chapitre 1 : Généralités

Chapitre 2 : Varves et lamines

Chapitre 3 : Sédimentologie des alluvions

Chapitre 4 : Composition des alluvions

Chapitre 5 : Etude quantitative de l'alluvionnement de la retenue

Chapitre 6 : Etude géotechnique

Conclusions générales.

CHAPITRE 1 : GENERALITES

1.1 : SITUATION GEOGRAPHIQUE

1.2 : GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT

1.3 : DONNEES CLIMATIQUES ET HYDRAULIQUES

1.4 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'AMENAGEMENT

1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le barrage du Chambon est situé à environ 60 km de Grenoble, sur la Romanche, au sein des reliefs de l'Oisans à 1040 m d'altitude.

Le bassin versant de la Romanche est limité par le massif de la Meije (3 983 m) au Sud, le Pic Ouest du Combeynot, le col du Lautaret et le Pic des Trois Evêchés à l'Est, le Goléon, les Pics du Mas de La Grave, de la Buffe d'en Haut et les Aiguilles de la Saussaz au Nord Est et au Nord.

1.2. GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA ROMANCHE

Les formations géologiques rencontrées dans le bassin versant de la Romanche, en amont du barrage du Chambon peuvent être regroupées en trois ensembles (Fig. 1.1).

- Le cristallin :

Le massif cristallin de la Meije (3 983 m) est partiellement recouvert par les glaciers. Il est constitué d'un granite alcalin leucocrate fortement quartzitique intrusif dans des granites migmatiques et des gneiss (LEFORT - PECHER, 1971). Ce massif est présent en rive gauche de la Romanche. Des terrains cristallins plus réduits se rencontrent aussi en rive droite (Combeynot).

- Les terrains sédimentaires :

Ils sont essentiellement représentés par le Flysh des Aiguilles d'Arves au Nord-Est du bassin versant et le Lias schisteux. Le Flysh des Aiguilles d'Arves correspond ici à une alternance de gros bancs de grés assez grossiers et de schistes à granoclassement. Le Lias schisteux se présente sous forme de schistes roux à noirs très silico-alvanineux. Les formations concernent avant tout la rive droite de la Romanche.

27 AOÛT 2003

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

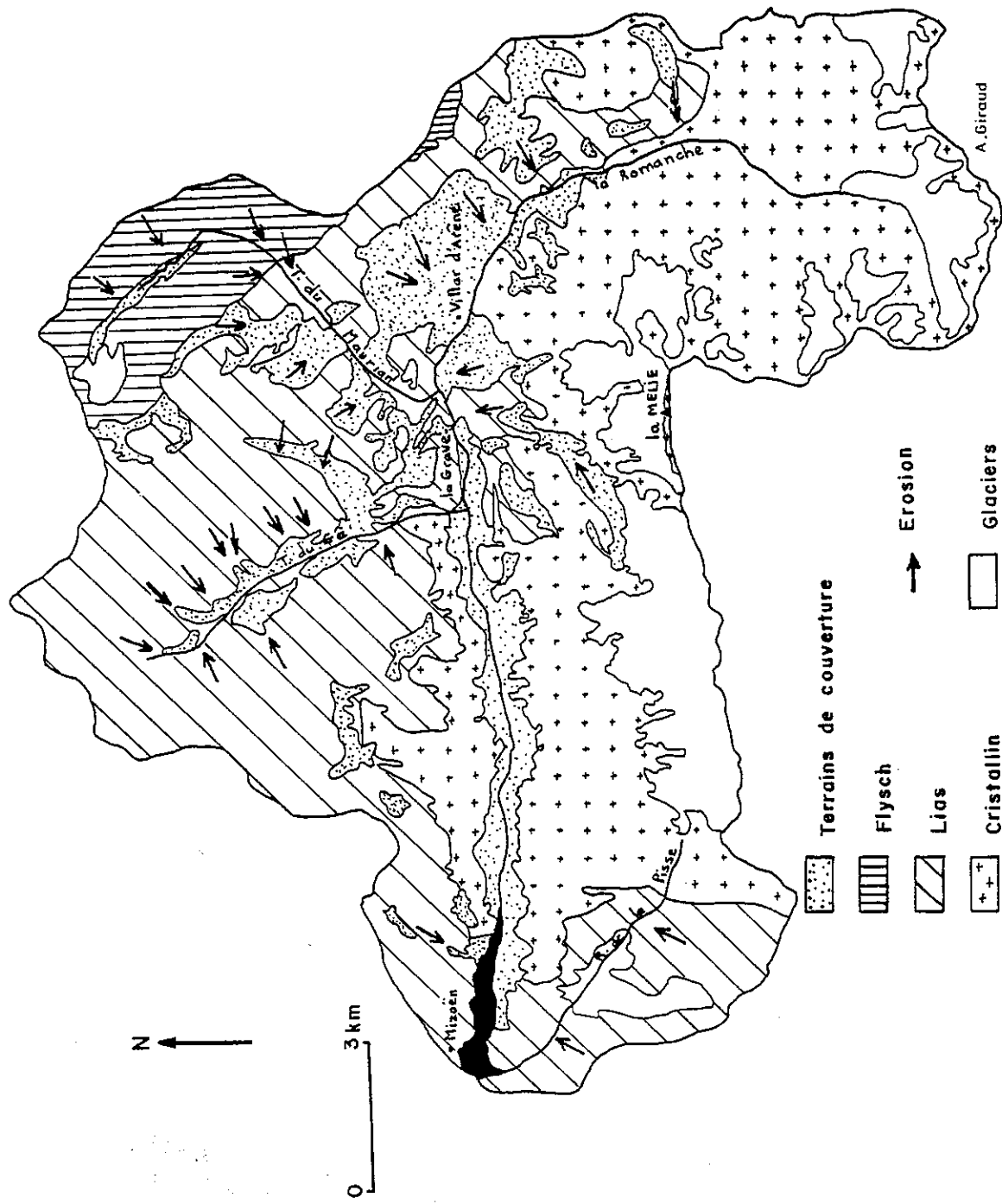


Figure 1.1 : Carte géologique simplifiée du bassin versant de la Romanche à l'amont du barrage du Chamblon

- Les terrains de couverture :

Ils comportent des formations glaciaires würmiennes et des formations actuelles (glaciaires, éboulis, alluvions, cônes de déjection). Les dépôts superficiels sont dispersés sur toute l'étendue du bassin versant.

La répartition aréale de ces trois ensembles est la suivante :

- terrains cristallins	:	47 %
- terrains sédimentaires	:	43 %
- terrains de couverture	:	10 % .

Les glaciers recouvrent 11 % de la superficie du bassin versant (glaciers du massif de la Meije et des sources de la Romanche).

1.3. DONNEES CLIMATIQUES ET HYDRAULIQUES

Ces données sont extraites des archives de l'E.D.F. (G.R.P.H. "Alpes") et de la Météorologie Nationale.

Les stations de référence sont :

- la station de jaugeage E.D.F. n° 1822 - La Chambon amont - altitude 1057,45 m
- la station météorologique n° 1732 - La Grave-le Chazelet - altitude 1780 m.

1.3.1. Températures

Il est nécessaire de préciser le régime thermique, celui-ci influençant à la fois la répartition des précipitations entre pluie et neige et le régime hydraulique d'un cours d'eau alimenté, en proportions variables selon la saison, par le ruissellement et la fonte.

Le tableau 1.1 basé sur des données de 1968 à 1978 regroupe les moyennes mensuelles et saisonnières des températures.

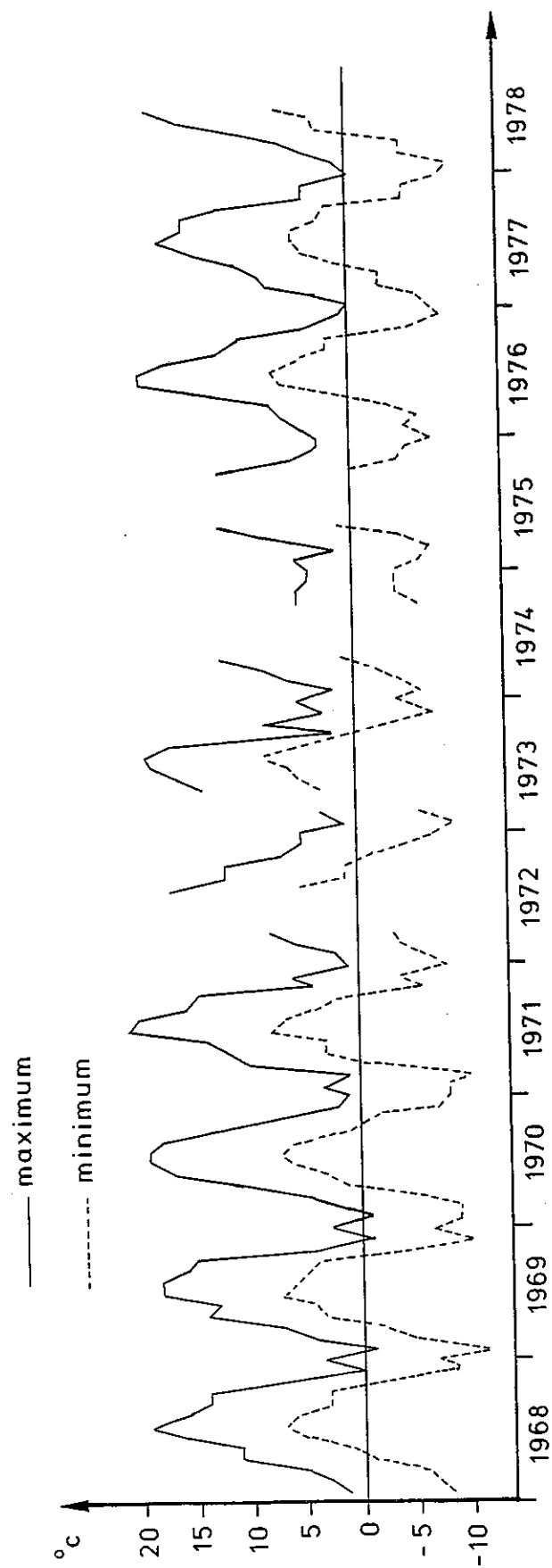


Figure 1.2 : Températures moyennes à La Grave - le Chazelet de 1968 à 1978. (données incomplètes pour les années 1972, 1973, 1974, 1975).

Sur la même période, on note une moyenne de 185 jours de gel par an (température minimale inférieure ou égale à 0 ° C dont 41 jours sans dégel (température maximale supérieure ou égale à 0 ° C) répartis comme suit : (tableau 1)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Jours de gel	31	28	28	21	10	2	1	1	4	6	23	30	185
Jours sans dégel	10	10	7	1	0	0	0	0	0	0	5	8	41

Tableau 1.2 : Répartition mensuelle des jours de gel et des jours sans dégel à La Grave-le Chazelet (altitude 1780 m)

La figure 1.2. illustre les variations saisonnières de la température.

Mois Températures en °C	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Moyennes des maximums	2,4	3	4,1	7,8	12	15,4	18,5	17,6	15	10,7	5,5	2,8
Moyennes des minimums	-6,7	-7,5	-5,9	-2,9	1,8	4,2	6,4	6,1	3,6	0,9	-3,5	-6,2
Moyennes mensuelles	-2,7	-2,7	-1,3	2,6	6,9	9,8	12,7	11,7	9,4	7,6	0,6	-2,5
Moyennes saisonnières	-2,2			6,4			11,2			1,9		

Tableau 1.1 : Moyennes mensuelles et saisonnières des températures (°C) à La Grave-le Chazelet (altitude 1780 m)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
\bar{x} (mm)	88	95	69	57	66	73	66	75	81	75	103	91	939
σ_x (mm)	61	74	48	39	27	30	35	42	56	51	61	71	183
x minimale (mm)	1	2	1	3	4	28	9	17	12	0	10	5	646
x maximale (mm)	271	296	194	3	116	132	170	198	219	222	371	266	1 230
Probabilité 10 % (mm)	10	0,5	7,56	7	31	35	21	21	9	10	25	0,2	701
Probabilité 90 % (mm)	166	188	130	107	101	111	111	129	153	140	181	182	1 169
Nombre de jours de précipitations	9	10	11	11	12	12	11	10	9	8	12	10	136
Nombre de jours de neige (de 1961 à 1977)	11	10	9	9	2	0	0	0	0	2	8	10	61

Tableau 1.3 : Précipitations La Grave-le Chazelet (altitude 1730 m)
de 1949 à 1979.

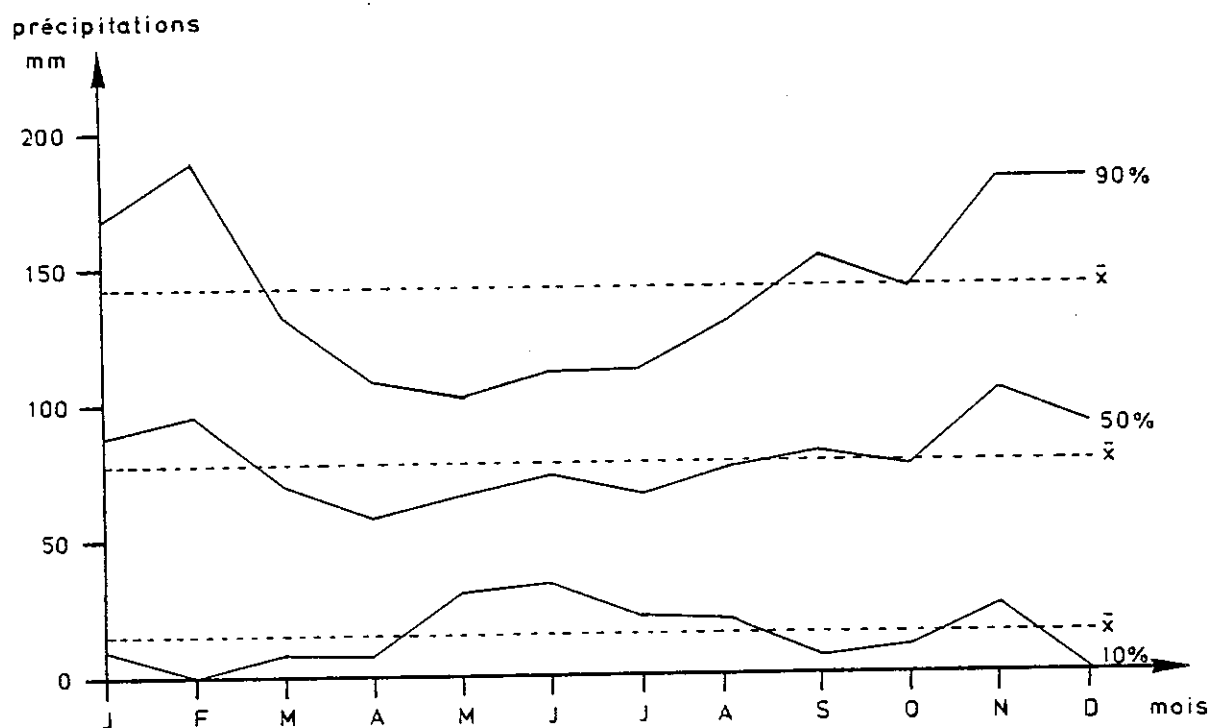


Figure 1.3 : Courbes de probabilité des précipitations à
La Grave-le Chazelet de 1949 à 1979.

1.3.2. Précipitations

Le choix de la station de La Grave-le Chazelet comme station de référence est dû à sa situation dans le bassin versant de la Romanche. Son altitude (1780 m) y est moyenne.

Le tableau 1.3 donne les résultats des dépouillements des données de 1949 à 1979. L'écart entre les valeurs extrêmes est très important. Ces extrêmes expliquent la dissymétrie des courbes de probabilité * (Fig. 1.3). Leur manque de parallélisme est dû aux valeurs élevées des écarts-types*.

Le mois le plus sec est avril ($\bar{x} = 57$ mm). Le plus pluvieux est novembre ($\bar{x} = 103$ mm). Ce dernier montre aussi l'écart le plus important entre valeurs extrêmes (10 et 371 mm).

L'étude des données année par année fournit aussi les résultats suivants :

- . précipitations minimales : 646 mm (1953)
- . précipitations maximales : 1 230 mm (1977)
- . année sèche décennale : 701 mm
- . année humide décennale : 1 169 mm .

On note à La Grave une moyenne de 136 jours de précipitations par an pour la période 1949 - 1979 et 61 jours de neige par an pour la période 1961 - 1977. Le fait d'avoir utilisé des périodes de références différentes pour les précipitations totales et la nivométrie explique pourquoi sur le tableau 1.3 figurent 11 jours de chute de neige pour le mois de janvier pour 9 jours de précipitation.

On remarque la très forte valeur du maximum de novembre (371 mm). Il correspond au tiers des précipitations de l'année 1950. Le second maximum est de 249 mm.

*)

$$\text{Moyenne} = \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\text{Ecart type} = \sigma_x = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\text{Probabilité 10 \%} = \bar{x} - 1,28 \sigma_x$$

$$\text{Probabilité 90 \%} = \bar{x} + 1,28 \sigma_x$$

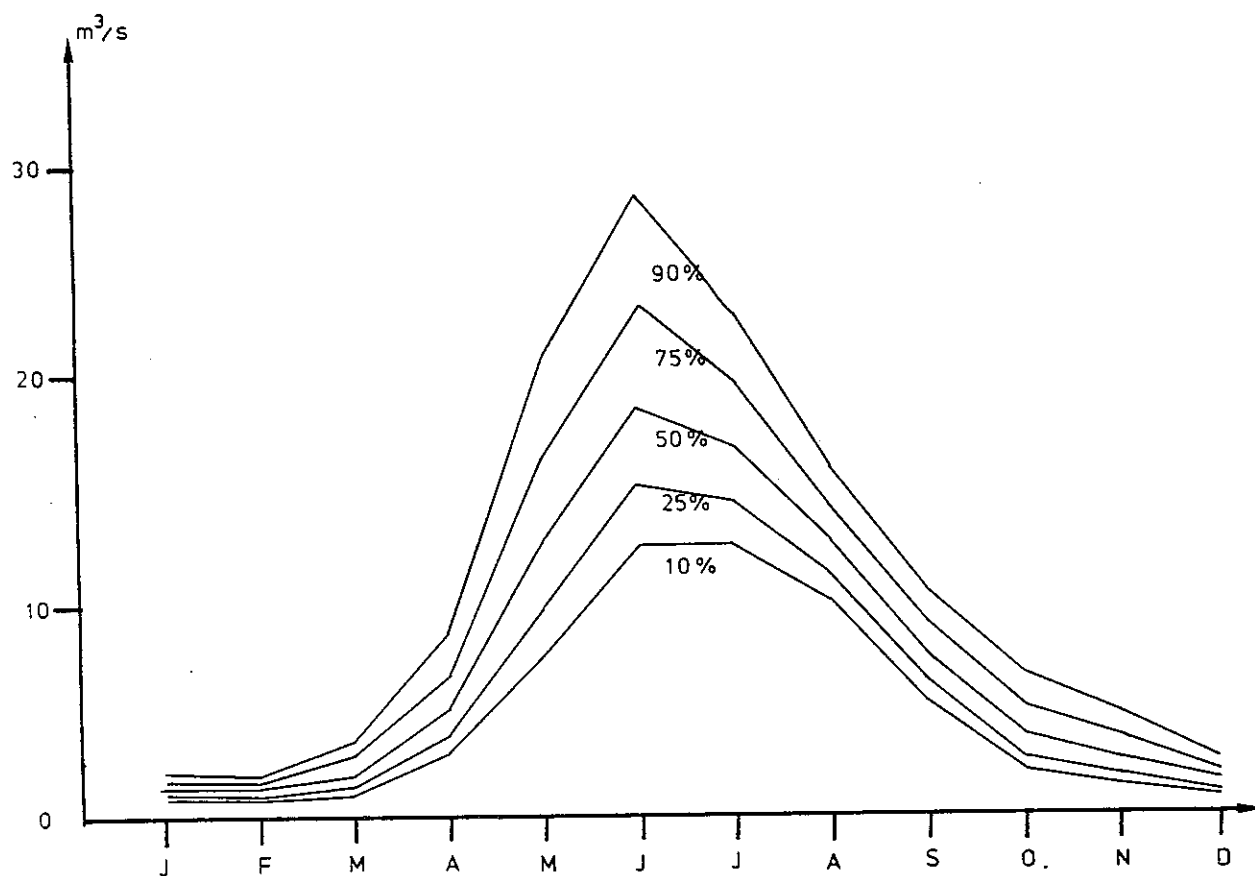


Figure 1.4 : Courbes de probabilité des débits moyens mensuels
de la Romanche à la station Chambon amont de 1936
à 1975.

1.3.3. Débits

La période de référence pour l'étude des débits est 1936 - 1975. Au niveau de la station de jaugeage Chambon amont (station n° 1822, altitude 1057 m), le bassin versant est de 220 km².

Mois débits en m ³ /s	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
moyenne (\bar{x})	1,43	1,35	2,17	5,20	13,5	19,4	17,4	12,7	7,5	4,05	2,92	1,89	7,5
minimum	0,71	0,53	0,94	2	4,57	10,5	11,6	8,7	4,06	1,97	1,22	1,05	5,1
maximum	3,9	2,8	4,45	10,3	22	35,4	32,5	17,7	13,9	12,8	5,95	4,49	10,3
lame d'eau équivalente en mm	17,5	14,9	26,4	31	164	228	212	155	88,5	49,3	34,4	23,1	1070
Débit spécifique en l/s/km ²	6,5	6,15	9,85	23,6	61,5	88	79,5	57,5	34,1	18,4	13,3	8,6	35

*Tableau 1.4 : Débits moyens mensuels et annuels de la Romanche
à la station Chambon amont de 1936 à 1975
(altitude 1057 m)*

L'observation des données et des courbes de probabilité des débits moyens mensuels montre un maximum en mai-juin (Fig. 1.4). Les débits restent importants jusqu'en août.

Ces caractéristiques se retrouvent dans la courbe des débits moyens journaliers en 1980 (Fig. 1.5). L'augmentation du débit débute fin avril, le pic maximum survenant en juin. Les débits sont restés ensuite assez élevés jusqu'en août, puis ont diminué, à l'exception d'une crue fin septembre.

D'une année à l'autre, les variations sont importantes. La moyenne annuelle est de 7,5 m³/s, le minimum et maximum annuels respectivement de 5,1 m³/s (1957) et 10,5 m³/s (1940 et 1952).

débits m^3/s

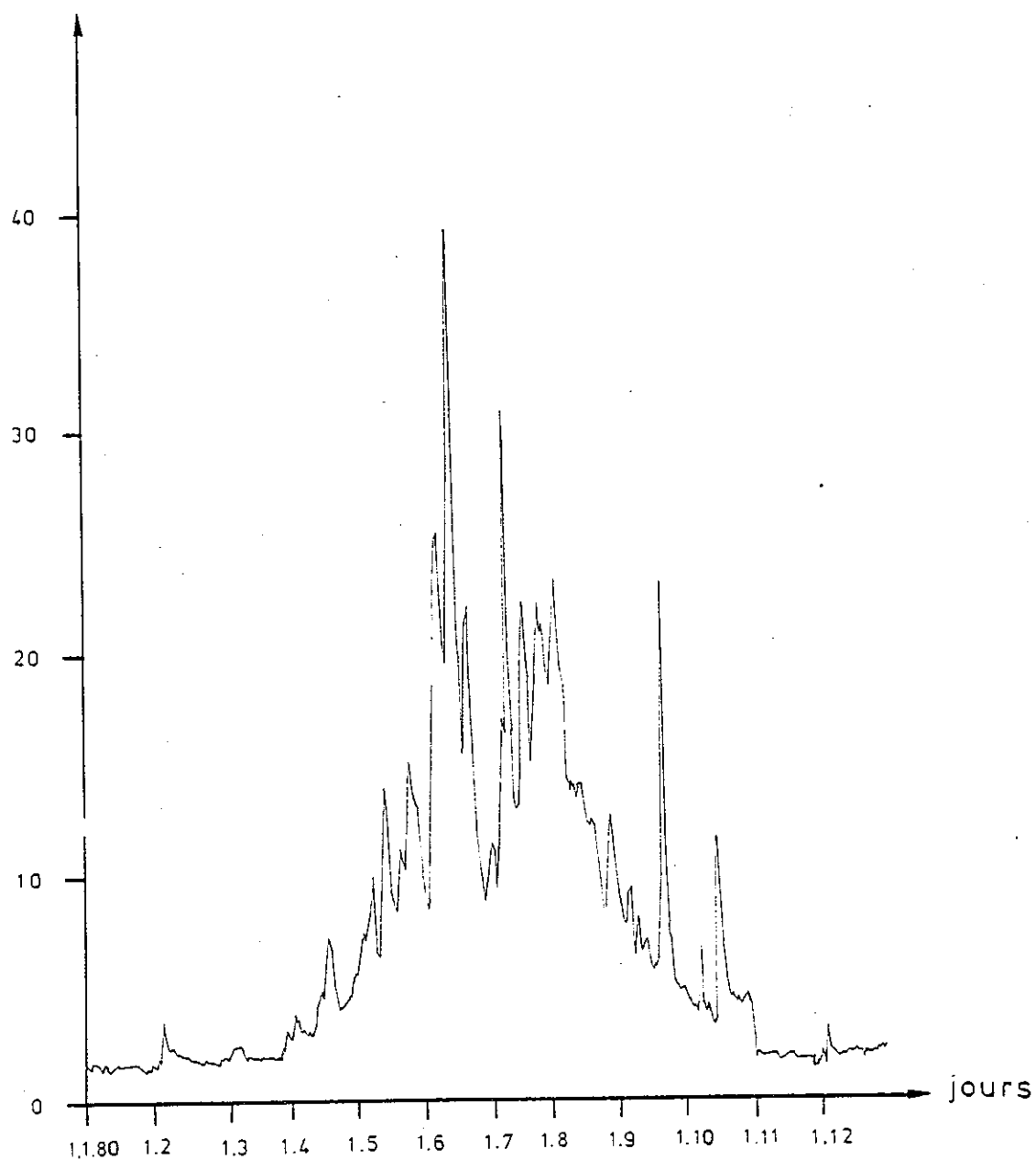


Figure 1.5 : Courbe des débits moyens journaliers de la Romanche :
la station Chambon amont en 1980.

Le débit spécifique est élevé : $q = 35 \text{ l/s/km}^2$. L'écart entre minimum et maximum mensuels est important. La proportion est de 1 à 67. Ces caractéristiques sont celles d'un cours d'eau à régime nivo-glaciaire.

Le tableau 1.5 donne les valeurs des débits moyens journaliers maximaux annuels de la Romanche de 1948 à 1981. Ils se situent entre mai et août, mais préférentiellement en juin. En 34 ans, 20 crues se sont produites en juin, 9 en mai, 3 en juillet, 2 en août.

La moyenne s'établit à $35 \text{ m}^3/\text{s}$ et les extrêmes à 16,5 et 52,2. Ces valeurs montrent que l'intensité des crues, qui peut être importante, est très variable d'une année à l'autre.

Dates	Débits moyens journaliers (m^3/s)	Dates	Débits moyens journaliers (m^3/s)
19 - 7 - 1948	45,6	17 - 6 - 1965	34,0
30 - 8 - 1949	19,0	11 - 6 - 1966	43,5
22 - 5 - 1950	38,0	27 - 6 - 1967	28,5
17 - 6 - 1951	40,0	11 - 7 - 1968	29,5
18 - 6 - 1952	34,0	16 - 5 - 1969	35,6
29 - 5 - 1953	25,0	9 - 6 - 1970	49,9
22 - 8 - 1954	24,0	18 - 5 - 1971	29,7
8 - 6 - 1955	50,0	6 - 6 - 1972	27,7
29 - 5 - 1956	22,0	5 - 5 - 1973	41,0
14 - 6 - 1957	30,0	29 - 6 - 1974	39,0
25 - 5 - 1958	43,4	16 - 6 - 1975	25,0
15 - 7 - 1959	26,8	12 - 6 - 1976	16,5
18 - 5 - 1960	39,0	13 - 6 - 1977	47,8
27 - 6 - 1961	41,4	8 - 6 - 1978	52,2
25 - 6 - 1962	35,6	20 - 5 - 1979	48,4
28 - 6 - 1963	38,8	14 - 6 - 1980	38,0
13 - 6 - 1964	20,8	3 - 6 - 1981	31,1

Tableau 1.5 : Débits moyens journaliers maximaux de la Romanche à la station Chambon amont (altitude 1057 m) de 1948 à 1981.

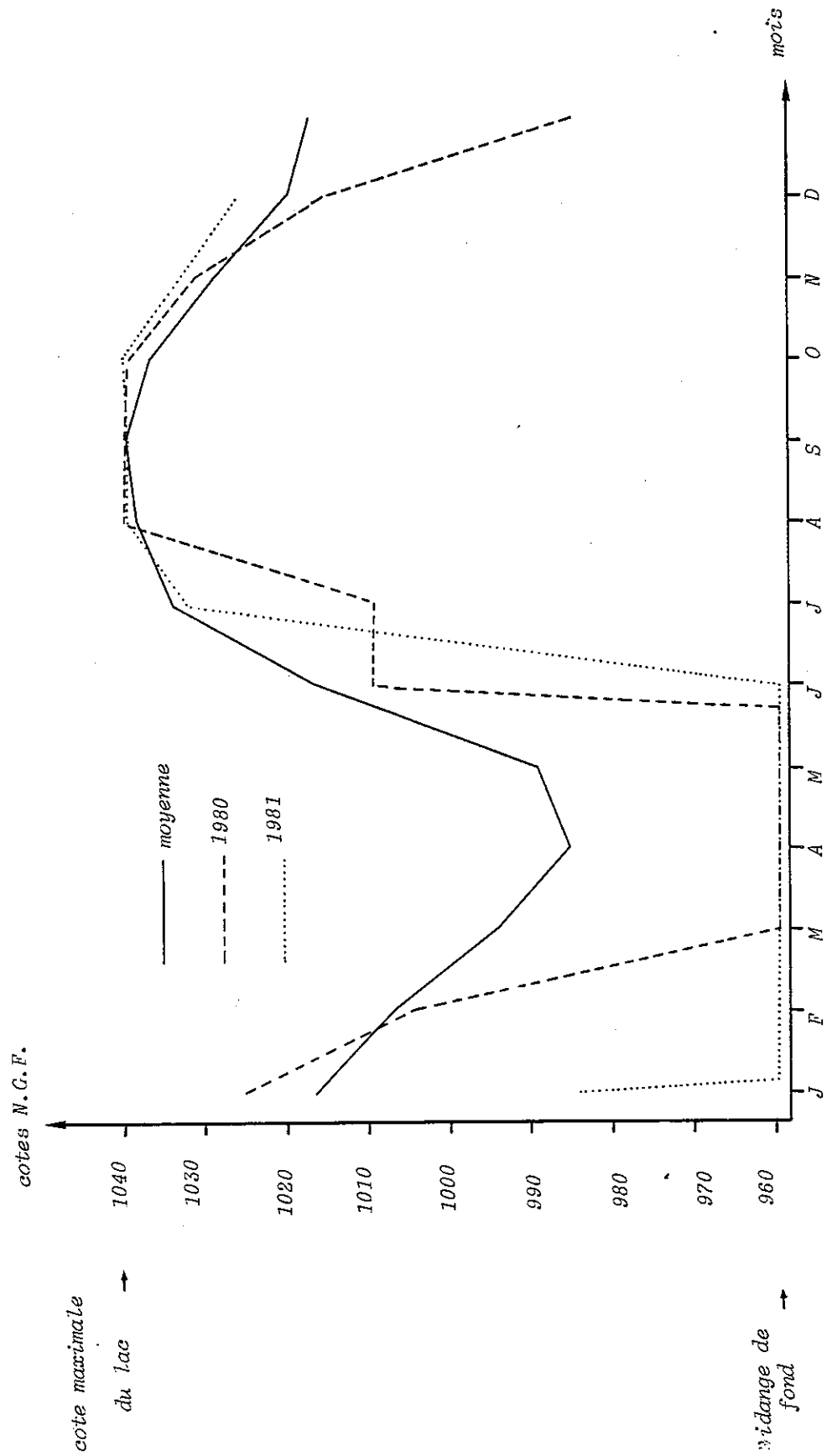


Figure 1.6 Variations mensuelles de la cote du lac de Chambon.

1.3.4. Conclusion : fluctuation de la cote du lac

L'étude comparative des précipitations et températures à La Grave-le Chazelet montre que, pour la période étendue de novembre à avril, la presque totalité des précipitations est stockée sous forme de neige. A partir de la fin du mois d'avril, la couverture neigeuse fond puis les glaciers prennent le relai. Les eaux de fonte et les précipitations vont alimenter la Romanche jusqu'au mois d'octobre. Cela se vérifie sur les courbes des débits (Fig.1.4. et 1.5.). En effet, lorsqu'on les compare à celles des précipitations (Fig 1.3.), on constate que les maximums et minimums sont opposés.

Ainsi le régime nivoglaciaire de La Romanche, qui commande le régime d'exploitation annuel de la retenue a pour conséquence directe une grande variation de la cote du plan d'eau (Fig 1.6.).

Lors de la fonte des neiges, puis des glaciers, le débit de la Romanche étant très supérieur aux débits turbinés, le lac atteint rapidement sa cote maximale (1040 m). En hiver, le débit étant inférieur aux débits turbinés, la cote du lac baisse. Le minimum est atteint en avril (environ 985 m). La fluctuation du plan d'eau de la retenue en fonction du mois de l'année a été représentée par une valeur moyenne, pour une période d'exploitation couvrant 31 années (1950 à 1980). Sur cette même figure ont été notées les courbes d'exploitation du réservoir pour les années 1980 et 1981 qui montrent une vidange complète du lac.

1.4. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE L'AMENAGEMENT

1.4.1 Fiche technique

- barrage poids arqué en béton
- hauteur : 90 m
- épaisseur à la base : 70 m
- première mise en eau : 15 avril 1935
- superficie du bassin versant de la Romanche : 254 km²
- superficie du bassin versant du Ferrand (capté en 1949) : 82 km²

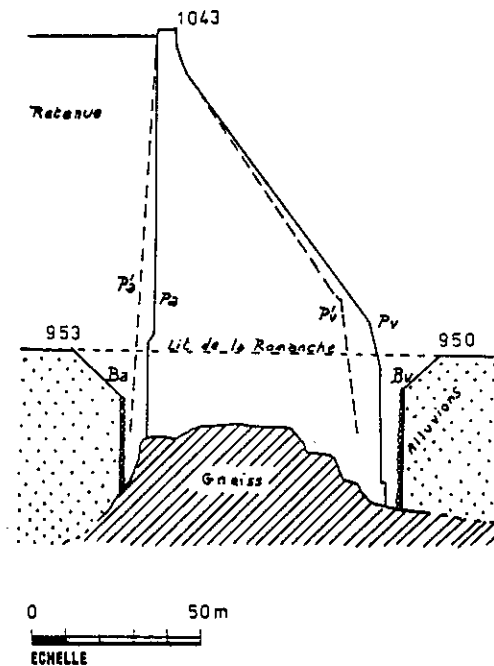


Figure 1.7. : Profil transversal du barrage du Chambon passant à peu près par les points les plus bas de la maçonnerie (région axiale du cañon rocheux). Ba et Br = boisages amont et aval entre lesquels ont été effectuées les fouilles profondes.
Pa et Pv = parements amont et aval réalisés.
P'a et P'v = parements amont et aval prévus avant les fouilles.

(d'après GIGNOUX et BARBIER, 1955).

- altitude moyenne du bassin versant : 2 200 m
- altitude maximale du bassin versant : 3 983 m (la Meije)
- superficie du lac : 140 ha
- cote maximale de la retenue : 1 040 m
- cote du lit de la Romanche au barrage : 950 m
- vidange de fond d'origine :
 - cote du seuil d'entrée : 951,48
 - débit maximal : 90 m³/s
- vidange de fond construite en 1962 :
 - cote du seuil d'entrée : 959,45
 - débit maximal : 110 m³/s
- capacité totale (à la cote 1040) : 54 10⁶ m³
- capacité utile (au-dessus de la cote 980) : 50 10⁶ m³

1.4.2. Particularités du site de l'ouvrage

Le façonnement glaciaire de la vallée de la Romanche lui a conféré une morphologie particulière dont le barrage tire parti.

"Le Chambon est situé à l'entrée d'une étroite gorge entaillée par la Romanche entre deux parois verticales de gneiss écartées de 10 à 20 mètres... Du côté de la rive droite, la paroi rocheuse descend presque verticalement du fait d'une zone de surcreusement glaciaire où le bassin de retenue s'élargit brusquement dans les schistes tendres du Lias.... Le barrage s'appuie sur du gneiss, sauf dans les parties supérieures des appuis latéraux constitués de calcaires triasiques sur les deux rives et de calcschistes argileux noirs du Lias en rive droite". (GIGNOUX, BARBIER, 1955).

Du fait de travaux de reconnaissance insuffisants, le creusement glaciaire au niveau du verrou a été sous-estimé. Cela a nécessité une modification du profil de l'ouvrage au cours des travaux (Fig. 1.7).

CHAPITRE 2 : VARVES ET LAMINES

2.1 : HISTORIQUE DU MOT "VARVE"

2.2 : COMPOSITION MINERALOGIQUE ET ORIGINE DES MINERAUX
ARGILEUX DES VARVES

2.3 : VALIDITE DE LA GEOCHRONOLOGIE PAR LES VARVES

2.4 : MODES DE DEPOT

2.5 : CONCLUSIONS : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE
TERMINOLOGIE

Les sédiments rencontrés dans la retenue du Chambon sont des silts argileux à lamines. De nombreux auteurs utilisent le terme de "varves" pour décrire ces faciès. Il nous paraît donc important de redéfinir ces termes et de présenter les théories proposées pour expliquer ce type de dépôt.

2.1. HISTORIQUE DU MOT "VARVE"

C'est au Suédois DE GEER que nous devons la définition originelle du mot "varve", à partir du mot "varvig", qui en suédois signifie rayé. Le terme créé par DE GEER (1910) dépendait d'une sédimentation glacio-lacustre se présentant sous la forme de couples de lamines, l'une claire et à grain grossier, l'autre sombre et à grain très fin. Chaque couple de lamines définit une varve.

DE GEER considéra les lamines grossières comme déposées par des courants de fond engendrés par la fonte annuelle des neiges et des glaciers dans un lac proglaciaire. De ce fait, DE GEER a pu affirmer le rythme annuel du dépôt d'une varve, la lamine à grain grossier caractérisant le printemps et celle à grain très fin l'hiver.

A la suite de DE GEER, toutes sortes de dépôts fins et feuilletés, où les lamines montrent une grande variété de structures, d'épaisseurs et de composition, reflétant la diversité des conditions de leur dépôt, ont été qualifiés de "varves". Mais c'était souvent s'écarter beaucoup de la définition originelle, au point que, depuis une dizaine d'années, de nombreux auteurs ont cessé de considérer les varves comme spécifiques des dépôts glacio-lacustres et en ont vulgarisé le terme à propos de dépôts simplement lacustres, voire lagunaires ou même marins.

2.2. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE ET ORIGINE DES MINÉRAUX ARGILEUX DES VARVES*

L'étude des processus de formation des varves nécessite une bonne connaissance de leur minéralogie.

Les argiles glaciaires de Fennoscandinavie montrent une dominante d'illite et accessoirement de chlorite. Elles se sont déposées en quantités considérables. Deux explications sont proposées pour expliquer ces grandes accumulations.

* terme utilisé par les auteurs cités.

ROSENQVIST (1955) propose la néoformation d'illite à partir des produits issus de l'altération glaciaire des roches cristallines. ROSENQVIST (1961) a montré que, lors des altérations préglaciaires, des micas dégradés et même de la montmorillonite ont pu se former à partir des silicates. Ces produits dégradés, venus en mer, auraient constitué des interstratifiés, puis de l'illite, pour parvenir à l'état actuel.

D'autres, comme COLLINI (1956), pensent que cette grande abondance doit être attribuée à l'érosion des couvertures sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire, couvertures aujourd'hui disparues, et que les glaciers ont aisément remaniées.

On se trouve donc dans le cas des argiles glaciaires de Scandinavie, avec une double possibilité : évolution chimique ou remaniement mécanique (MILLOT, 1963). Les varves étudiées par ALLENS et JOHNS (1959) au Canada sont composées d'illite, chlorite et vermiculite. Ce dernier minéral évoque des altérations ménagées, telles qu'on les rencontre en climat humide.

LAFOND et al. (1961) ont analysé l'argile provenant de trois glaciers contemporains des Alpes françaises et ont découvert que l'ensemble était essentiellement constitué d'illite avec de petites quantités de chlorite. Leur interprétation a été que cette argile est le simple produit de la désagrégation des roches cristallines ce qui exclut le processus de néoformation pendant le transport.

HUFF (1974) s'est appuyé sur cette théorie pour expliquer la composition des argiles "varvées" du Trièves (illite et chlorite dominantes).

REYNOLDS (1971), dans une étude détaillée des processus pédogénétiques dans l'environnement tempéré froid du Glacier du Sud, dans le Nord-Ouest de l'état de Washington a conclu que la vermiculite et la phlogopite, ainsi que la smectite sont actuellement en formation à partir d'un bed-rock de roches ignées et métamorphiques, sous l'action des eaux froides chargées en CO_2 .

LINEBACK, DELL et GROSS (1979) ont étudié des varves déposées au niveau du Lac Supérieur lors du retrait des derniers glaciers. Les lamines sont différenciées par des variations de teintes dues à une plus grande proportion en calcite et de dolomite dans les lamines de printemps. La teneur en illite, minéral dominant, varie peu d'une lamine à l'autre. Dans cet exemple, où la granularité des lamines est sensiblement constante, la variation de teneurs en carbonates est le seul critère permettant de définir des "varves".

Ainsi, tous les auteurs ayant étudié les dépôts lacustres en environnements glaciaires et périglaciaires ont constaté comme MILLOT (1963) que l'illite puis la chlorite y sont les minéraux dominants.

2.3. VALIDITE DE LA GEOCHRONOLOGIE PAR LES VARVES

La difficulté de l'utilisation des varves comme outil efficace pour la géochronologie réside dans la définition du terme et la connaissance du mécanisme de son dépôt.

S'appuyant sur la définition qu'il avait lui-même proposée (dépôt d'une varve ou paire de lamines par an), DE GEER (1912) élaborait une géochronologie des 12 000 ans écoulés en Scandinavie et en Amérique du Nord par comptage des varves. Ces résultats ont permis l'établissement de corrélations entre les deux continents (DE GEER, 1912; ANTEVS, 1922; SAURAMO, 1923).

La validité de la datation de DE GEER a pu être prouvée par le dosage du ^{14}C . Ainsi DE GEER (1955) a été l'un des plus ardents défenseurs de sa théorie : "Il faut se rendre compte que la géochronologie de DE GEER n'est plus à mettre en doute. Sa première mise à l'épreuve, au test du ^{14}C à Stockholm, sur le bois du Bulwark à Gothland (1935), daté avec le séquoia, a donné un résultat le confirmant pleinement, rejoignant à peu de chose près l'âge indiqué par elle (DE GEER, 1935)".

Toutefois, ANTEVS (1957) a observé des différences d'âges donnés par les varves et le ^{14}C . Ces différences sont minimes, mais augmentent avec l'ancienneté.

L'âge donné par le ^{14}C est progressivement trop récent à mesure qu'on remonte dans le temps. L'une des causes de ce phénomène serait, d'après ANTEVS, la radioactivité naturelle.

Dans l'étude des datations au radiocarbone, il ne faut pas perdre de vue que le ^{14}C contenu dans les lits organiques a pu subir des modifications, de telle sorte que des analyses ne donnent pas l'âge actuel réel de l'échantillon.

En 1979, TOLONEN a étudié les corrélations entre la datation par le carbone ^{14}C , la palynologie et le décompte des varves. Il constate une bonne corrélation entre le ^{14}C et les varves pour les âges antérieurs à 20 000 ans. La corrélation devient

mauvaise à partir de l'apparition d'une activité agraire, celle-ci ayant provoqué un apport supplémentaire de matière organique allochtone. Les corrélations entre la dendrochronologie, la palynologie et le décompte des varves restent bonnes. Dans cet exemple, la détermination de l'âge des sédiments grâce aux varves est un bon outil pour la géochronologie.

Il semble que la validité de la datation par les varves peut varier suivant les conditions de dépôt. LOUGEE (1954) estime que les varves sont un bon outil de datation dans les régions glaciaires.

Les varves ne peuvent être utilisées pour la géochronologie que lorsqu'il est possible d'affirmer la rythmicité annuelle des couples de lamines. Ainsi, BOYKO-DIAKONOW (1978) a utilisé les varves déposées dans le Lac Crawford, Ontario, Canada, pour établir une chronologie pollénique absolue des 200 dernières années.

2.4. MODE DE DEPOT

2.4.1. Milieu lacustre

2.4.1.1. Rôle de la stratification thermique

Ce phénomène conditionnant la physionomie des dépôts lacustres, il est nécessaire de le décrire préalablement (Fig 2.1.).

1)	<u>10 °C</u>	2)	<u>0 °C</u>
	<u>9 °C</u>		<u>1 °C</u>
	<u>8 °C</u>		<u>2 °C</u>
	<u>7 °C</u>		<u>3 °C</u>
	<u>6 °C</u>		<u>4 °C</u>

Figure 2.1 : Exemples de stratification thermique due aux variations de densité de l'eau selon la température (stratification directe dans le cas 1, inverse dans le cas 2).

La classification thermique des lacs (COLLET, 1925, d'après FOREL), "repose sur la notion du maximum de densité de l'eau qui se trouve à 4 °C. Il en résulte immédiatement dans certains cas une stratification thermique directe ou une stratification thermique indirecte"

. Stratification thermique directe : la température du lac décroît de la surface vers la profondeur (température du lac supérieure à 4 °C).

. Stratification thermique inverse : la température croît de la surface vers la profondeur (température du lac inférieure à 4 °C).

2.4.1.2. Rôle des courants de densité

Il existe une grande confusion dans l'utilisation des termes "courant de densité" et "courant de turbidité". Pour la définition de "turbidity current", le "Dictionary of geological terms" de l'American Geological Institute (1962) renvoie à "density current" (courant de forte turbidité et relativement dense s'épanchant au fond d'une étendue d'eau calme). Cette définition rejoint celle du Dictionnaire de Géologie de FOUCAULT et RAOULT (1980) : "Masse d'eau d'eau contenant en suspension des matériaux détritiques terrigènes et qui, du fait de sa densité ainsi rendue plus forte que celle des masses d'eau environnantes, descend par gravité les pentes marines ou lacustres et vient s'épancher sur le fond où sa vitesse diminuant, se sédimentent alors les sédiments transportés en donnant des turbidites".

La plupart des auteurs que nous avons rencontrés lors de notre bibliographie pensent que les turbidites ne sont qu'une des figures sédimentaires qu'un courant de turbidité peut créer. En particulier, ils associent les courants de turbidité à la formation des varves et autres sédiments à lamines. Ils sont en accord avec STURM et MATTER (1978) qui définissent trois types de courants de densité dans un lac stratifié thermiquement (Fig. 2.2).

Si malgré sa charge, l'eau de la rivière affluente a une densité inférieure à celle du lac, elle se déplacera à la surface de celui-ci (overflow).

Pour certains, un courant de turbidité ne pourra engendrer que le dépôt d'une turbidite, ainsi que BOUMA (1962) l'a définie (cf. 3.3.5).

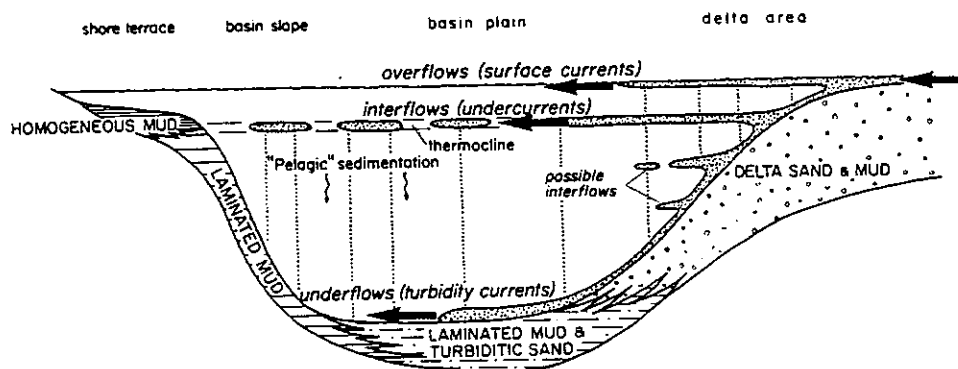


Figure 2.2 : Distribution des courants et sédiments types en résultant, dans le cas d'une sédimentation clastique dans un lac oligotrophique à stratification thermique annuelle. La profondeur du bassin et l'épaisseur des sédiments ne sont pas à l'échelle (STURM et MATTER, 1978).

Si la stratification thermique du lac est telle que l'eau de la rivière est plus dense que l'épilimnion mais moins dense que l'hypolimnion, elle formera un courant dit d'interflux (interflow) au niveau du thermocline *.

Si l'eau de la rivière est plus dense que l'hypolimnion, elle s'épanchera sur le fond du lac en formant un courant d'inféorflux (underflow) ou courant de turbidité.

2.4.1.3. Origine et formation des varves clastiques

Différents auteurs considèrent que la formation des varves dépend de l'existence d'un matériau en suspension dans une colonne d'eau (DE GEER, 1912 ; SAURAMO, 1923 ; KUENEN, 1951 ; GUSTAVSON, 1975 ...).

STURM (1978) distingue cinq sources d'apports pour la formation des matériaux en suspension :

- rivière, ruisseaux, torrents : les matériaux proviennent de l'érosion dans le bassin versant, de glissement de terrains, avalanches, glaciers, etc... ;

* Le thermocline est la profondeur à partir de laquelle une diminution rapide de la température provoque une augmentation de la densité de l'eau. Il stratifie l'eau d'un lac en deux couches, l'inférieure est l'hypolimnion, la supérieure l'épilimnion.

- air : les matériaux sont transportés sous forme de fines particules par le vent, la pluie, la neige, les éruptions volcaniques ;
- autochtone : par précipitation chimique dans le bassin ;
- remise en suspension : les matériaux dérivent de l'activité de courants profonds, de bioturbations.
- "upwelling" : les matériaux en suspension sont la conséquence de l'activité de sources sous-aquatiques ou d'exhalaisons volcaniques.

La quantité totale de matériaux déposés correspond à la somme de ces apports, diminuée des matériaux emportés par la rivière servant d'émissaire.

Ce schéma peut être appliqué à n'importe quel bassin, lacustre ou marin, glaciaire ou non glaciaire. Toutefois, la matière en suspension dans un lac oligotrophique alpin avec une prédominance de sédimentation clastique tire son origine presque exclusivement des rivières affluentes.

Des phénomènes occasionnels, tels que glissements sous-aquatiques, courants de fond, peuvent provoquer la remise en suspension de particules qui viennent accroître la quantité de matériaux déjà en suspension.

Les apports de matières en suspension peuvent être soit continus, soit discontinus, tout au long de l'année.

La stratification thermique de la colonne d'eau est le second paramètre important pour la formation de varves, tout au moins dans un environnement clastique.

Ainsi, les différences de densité dues d'une part à la concentration de matière en suspension et, d'autre part, à la stratification thermique de l'eau seraient les agents déterminants de la formation de varves dans un lac à sédimentation clastique.

Les eaux du lac peuvent montrer trois modes de stratification thermique : stratification toute l'année, absence totale de stratification, stratification temporaire (généralement en été).

Ainsi, STURM (1978) a étudié 8 cas idéaux de dépôts dans un lac oligotrophique à sédimentation clastique (tableau 2.1).

Les cas 1, 2, 5, montrent que l'apport continu de matière en suspension dans un lac est la cause de dépôts "chaotiques", c'est-à-dire de dépôts de sédiments inorganisés ne montrant pas de lamination régulière. Dans un lac annuellement stratifié, les particules argileuses peuvent être piégées à l'intérieur de l'épilimnion, provoquant la formation d'un très fin lit, riche en argile, à l'intérieur du sédiment chaotique (cas 5).

Un apport continu de matière en suspension dans le lac - qu'il soit stratifié ou non - peut aussi être responsable de la formation de sédiments varvés.

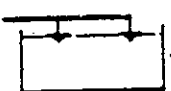
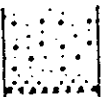
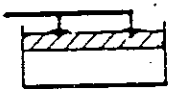
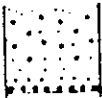
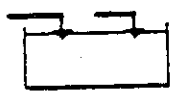

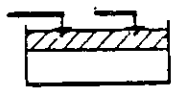
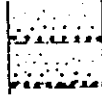
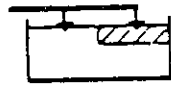
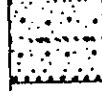
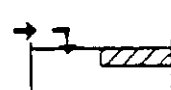
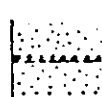
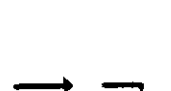
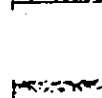
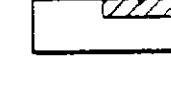
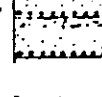
STRATIFICATION THERMIQUE DE L'EAU	APPORTS DETRITIQUES		TYPES DE DEPOTS	
non	flux continu		1 	chaotique granoclassé
oui	flux continu		2 	comme 1, mais diminution de l'argile
non	flux discontinu		3 	bien granoclassé (pour chaque pulsation)
oui	flux discontinu		4 	comme 3, mais diminution de l'argile
temporaire	flux continu		5 	comme 1, mais enri- chissement en argile
temporaire	flux discontinu lors de la non- stratification		6 	comme 3
temporaire	flux discontinu lors de la stratification		7 	granoclassé et enrichissement en argile
temporaire	flux discontinu		8 	comme 7, avec des grains grossiers dans des lits argileux

Tableau 2.1 : Types de dépôts idéaux résultant de deux paramètres hydrologiques (stratification de l'eau et apports détritiques) dans un lac oligotrophique à sédimentation clastique. Le cas 5 représente une varve classique (STURM, 1979).

Différents types de dépôts peuvent être liés à des apports discontinus de matière (cas 3, 4, 6, 7, 8). A l'intérieur d'un lac non stratifié, comme dans un lac stratifié, les particules sableuses, silteuses et argileuses se déposent exclusivement selon la loi de Stokes, cela en l'absence de forces perturbatrices telles que des turbulences induites par des gradients de densité. Dans ce cas, les dépôts montreront une granulométrie allant des sables aux argiles (cas 3, 4, 6). Alors, on observera une succession plus ou moins régulière de lits ("graded beds"), représentant chacun une pulsation de matière en suspension ; ce qui ne correspond pas à la structure des varves classiques, car les varves montrent des lits grossiers basaux surmontés par des lits argileux non granoclassés.

Le cas 7 représente les conditions qui induisent le mécanisme de dépôt bimodal d'une varve classique : la matière en suspension est introduite dans le lac par un courant discontinu lors de la période de stratification. Les particules grossières se déposent en un lit gradué de sable et de silt. Les particules argileuses, piégées au niveau du thermocline lors de la stratification du lac se déposent en un lit non granoclassé d'argile, directement au-dessus du lit grossier au moment où les eaux cessent d'être stratifiées.

Le cas 8 est celui où périodiquement de la matière en suspension est introduite dans un lac à stratification thermique. Dans ce cas, les structures sédimentaires sont identiques au cas 7. Les apports détritiques, pendant la période de non stratification introduisent des niveaux grossiers (sables et silts) à l'intérieur du lit argileux. Ce type de mécanisme décrit mieux l'aspect inhabituel des lits grossiers à l'intérieur de lits argileux d'hiver, comme cela a été observé au Lac Hitchcock (U.S.A.) et dans les varves pleistocènes du lac Penticton (Canada) (SHAX, 1978).

Les travaux de STURM (1978) montrent que la connaissance des paramètres hydrologiques d'un bassin, tels que l'apport de matière en suspension et la stratification de la colonne d'eau permettent de prévoir l'aspect de la sédimentation.

Toutefois, il a été démontré que les structures sédimentaires bimodales des varves clastiques ne peuvent apparaître que si des apports discontinus (saisonniers) de matière en suspension ont lieu à l'intérieur d'une colonne d'eau stratifiée (cas d'un lac oligotrophique dont la sédimentation est à prédominance clastique).

2.4.1.4. Quelques exemples

2.4.1.4.1. Les varves clastiques du lac de Brienz (Suisse)

Le lac, étudié par STURM et MATTER (1978), présente une stratification thermique de mars à novembre avec un thermocline à environ 25 m de profondeur. Les sédiments prélevés sont regroupés en quatre types : "boue homogène, boue à lamines ("varves"), boue à lamines et sable granoclassé, boue et sable deltaïque".

La "boue à lamines", déposée en bordure du bassin montre une alternance régulière de lits sombres et clairs, en couples n'excédant jamais 10 mm d'épaisseur. Les lits sombres sont toujours faiblement granoclassés, moins argileux et plus carbonatés que les lits clairs.

La "boue à lamines et sable granoclassé", déposée au centre du bassin est constituée de varves contenant des intercalations de lits silteux ou sableux.

Les lits grossiers des "varves" ainsi que les sables granoclassés se seraient déposés sous l'action de courants de turbidité de faible énergie ne se produisant que lors des orages de printemps. Les lits clairs sont constitués de particules argileuses piégées par le gradient de densité au niveau du thermocline, jusqu'à l'inversion hivernale de la stratification thermique.

Ainsi, ni les modèles de DE GEER (1910), KUENEN (1951) et LATJAI (1967) qui invoquent seulement les courants de turbidité dans la formation des varves, ni le modèle d'ANTEVS (1971) qui invoque uniquement les interflux, n'apportent d'explication complète des dépôts lacustres à lamines clastiques.

Cette étude suggère que deux modes de dépôt interviennent : les interflux, dus à la stratification thermique du lac d'une part et les courants de turbidité d'autre part.

2.4.1.4.2 Les varves postglaciaires des lacs de Zurich et de Zug (Suisse)

KELTS (1978) a montré que les "varves" déposées lors de la dernière glaciation reflètent le climat et l'activité glaciaire aux confins du bassin. Ces "varves", dont le taux de sédimentation annuel varie de 0,18 à 0,30 mm, montrent diverses

associations de sables et lutites. Dans certains niveaux lutitiques, on observe une microgranulation, preuve d'une origine par inféroflux.

Ces rythmes ont servi de niveaux repères dans divers lacs compris dans le même intervalle stratigraphique. Ce qui démontre bien le lien entre la rythmique de ces dépôts et les conditions climatiques.

2.4.1.4.3. Les varves pleïstocènes de l'Okanagan, Colombie Britannique (Canada)

SHAW et ARCHER (1978) ont montré que les varves du lac Penticton auraient été déposées, lors de la dernière glaciation du Wisconsin, par des courants de turbidité. Ceux-ci sont responsables de la mise en place de lamines grossières, non seulement lors de la fonte comme dans les varves classiques, mais aussi en hiver, et alors interstratifiées avec des lamines argileuses. En conséquence, la théorie classique selon laquelle la sédimentation est grossière en été et fine en hiver doit être nuancée.

Les structures entrecroisées, observables dans les "varves" étudiées par SHAW et ARCHER, sont généralement attribuées à des courants d'inféroflux charriant des sédiments pendant la fonte des glaces (GUSTAVSON et al, 1975).

Cet exemple montre que l'hiver peut aussi se révéler une époque où de puissants courants d'inféroflux traversant les lacs, charrient d'importantes quantités de sédiments grossiers.

La présence de "demi-varves hivernales contenant des lits distincts" avait été signalée dans le lac Tide (Colombie Britannique) par HANSON (1932).

2.4.1.4.4. Les varves du Walensee (Suisse)

LAMBERT, KELTS et MARSHALL ont effectué des mesures pour mettre en évidence les "courants de turbidité" dans le lac de Walensee. Ils ont étudié leurs relations avec les affluents, déterminé si les cycles de dépôts sont annuels et si les varves sont un outil fiable pour la géochronologie.

Leurs investigations ont confirmé les affirmations de DE GEER selon lesquelles les eaux chargées de sédiments peuvent engendrer des courants de turbidité déposant des varves, mais mis en doute la seconde interprétation selon laquelle les varves sont nécessairement annuelles.

Les sédiments du Walensee consistent en une succession de couches de silts grossiers ou de sables à la base et d'argiles au sommet. La couleur des différentes couches varie sans qu'il y ait de répétition régulière dans la succession.

L'étude minéralogique de ces varves montre du quartz, des feldspaths, des carbonates, des micas, de la chlorite. La minéralogie est le reflet de la composition du bedrock dans le bassin versant. Il n'y a donc pas de néoformation.

LAMBERT (1979) a compté le nombre de lamines au-dessus de la couche de 1811. Ce nombre entre 1811 et 1891 n'a pas été de 160, comme prévu par le cycle annuel, mais de 300 à 360. De plus, 70 lamines de silt grossier se sont déposées dans un intervalle de 30 ans après l'inondation de 1944. Cela indique qu'en moyenne plus de deux couches à lamines siteuses se sont déposées par an. Une étude plus directe consiste à déposer un "piège à sédiments" dans le fond du lac pour recueillir l'accumulation annuelle des sédiments.

STUMPF (1961) a installé un tel piège dans le Walensee. Au bout d'un an, il récupéra 9 mm de sédiment et identifia 5 "varves" (soit 10 lamines).

LAMBERT (1979) a montré que les courants de turbidité, sur une épaisseur de quelques mètres, et avec un maximum de vitesse de 30 cm/s sont actifs au printemps, lors de la fonte des neiges, lorsque le lac n'a pas encore de stratification de densité.

Les "varves" du lac Walensee ont été déposées par des courants turbiditiques continus représentant le prolongement des eaux profondes provenant du principal affluent.

Les données à la fois sédimentologiques et hydrodynamiques du Walensee montrent sans doute possible que les lamines de silts et d'argiles ne se sont pas nécessairement déposées au cours de cycles annuels. La fréquence des dépôts de varves dépend surtout de la fréquence des périodes de hautes eaux.

Il ne faut pas non plus généraliser en disant qu'aucune varve ne se dépose en un cycle annuel. Peut-être que les sédiments laminés du Walensee ne devraient-ils pas être appelés des varves. Avant toute chose, les varves devraient être définies plus précisément avec une spécification quantitative de la régularité des rythmes.

Aborder une telle définition nécessiterait une étude descriptive systématique des divers paramètres mesurables de nombreux dépôts varvés. Les conclusions remarquables auxquelles aboutit LAMBERT (1979) sont que les varves du Walensee se sont déposées sous l'action de courants de turbidité, mais ne correspondent pas à une sédimentation annuelle.

2.4.1.4.5. Les varves glaciaires pleistocènes de l'Ontario (Canada)

Cette étude a été entreprise par BANERJEE (1973). Elle révèle que, comme dans de nombreux autres exemples, les courants de turbidité engendrés annuellement par les eaux de fonte jouent un rôle important dans la formation des varves pleistocènes en Ontario. Cela est démontré aussi bien par la structure des couches individuelles que par leur assemblage.

BANERJEE (1973) a étudié, entre autres, la répartition des grains dans une série de varves pleistocènes du lac glaciaire Barlow-Ojibway au Nord de l'Ontario et du lac Iroquois au Sud. Des analyses granulométriques séparées, sur 27 couches de silt (été) et sur 11 couches d'argile (hiver), ont montré des différences substantielles. Dans les couches du silt, il existe un lien entre l'épaisseur et la grosseur des grains et il n'y a jamais plus de deux modes dans le silt. Au contraire, il n'y a pas de relation entre l'épaisseur et la grosseur des grains dans les couches d'argile, et il y a toujours plus de deux modes. BANERJEE pense que cela reflète leur origine différente : le silt a été déposé par des courants de turbidité et l'argile par décantation et par des courants de turbidité.

2.4.1.5. Conclusions

Ces exemples montrent la prépondérance des courants d'inféoflux dans la mise en place des "varves". Mais a-t-on le droit de nommer ces sédiments des varves ? Très souvent, on ne retrouve pas la définition de DE GEER (un couple de lamines par an, l'une claire à grain grossier au printemps, l'autre sombre argileuse). La lamine argileuse est très souvent perturbée par une ou plusieurs lamines grossières venant s'y interstratifier. Ainsi, JARNEFORS (1956) cite des niveaux clairs à l'intérieur des lits sombres des composants hivernaux de varves dans le district d'Uppsala. De même, BERGSTROM (1968) note des lits grossiers dans les lamines argileuses de varves suédoises : "Les varves inférieures montrent souvent à l'intérieur des lits argileux d'hiver, généralement de 2 à 5 mm d'épaisseur, des interlits avec deux ou trois niveaux de 0,5 à 1 mm d'épaisseur, et quelquefois une lamine sableuse... L'orifice de cette disposition n'est pas connue".

2.4.2. Milieu lagunaire

Par cet exemple, nous voulons signaler que la sédimentation glacio-lacustre n'a pas le monopole des "varves" à moins qu'une entente ne se réalise sur une définition plus stricte de celle-ci.

Dans le Nord de l'Italie, près de Vérone, à Bolca, des niveaux varvés éocènes ont été mis en évidence dans les "couches à Poissons" (MASSARI et SORBINI, 1975).

L'analyse sédimentaire de la série conduit à l'individualisation d'une séquence de type répétitif. La séquence-type est constituée d'une couche inférieure, plus ou moins grossière, et d'une couche supérieure varvée faite d'une alternance régulière de lamines claires épaisses et de lamines nettement plus minces dont la teinte gris foncé est due à la présence d'une micritesapropélique.

Cette série se trouve dans un site qui était à la lisière de la mer Mésogéenne. Il est indéniable que cette structure rythmique rappelle de très près les classiques varves annuelles lacustres. Ce faciès varvé représente selon toute probabilité le dépôt caractéristique d'un milieu protégé et peu profond, à niveau énergétique à peu près nul, comme une lagune ayant des communications limitées avec le large et présentant un rythme annuel.

Dans ces conditions particulières, et avec une périodicité probablement du même ordre de grandeur que celle des varves, il pourrait se produire des phénomènes de mortalité en masse des organismes nectoniques ayant pénétré dans la lagune, probablement à cause d'une croissance du rapport H_2S/O_2 et d'un empoisonnement répété des eaux lors de l'accumulation de grandes quantités de substances organiques (phénomène de waterbloom).

Selon l'époque et le lieu, ces conditions trop restrictives pouvaient s'atténuer : une circulation plus active et une plus grande oxygénation autorisaient alors l'existence d'un milieu favorable à une faune benthique.

En définitive ce faciès varvé correspond, comme dans les autres exemples, à des variations périodiques des conditions de dépôt. L'intérêt de cet exemple réside dans le fait que ce bassin dont la salinité était sujette à des variations dans le temps et dans l'espace, comporte des analogies avec de nombreux milieux lagunaires actuels.

2.4.3. Milieu saumâtre

Deux conditions sont nécessaires pour pouvoir observer des dépôts actuels à faciès varvé ou laminé : le matériel sédimentaire doit donner des dépôts distincts en réponse aux variations saisonnières et les sédiments fraîchement déposés doivent rester intacts et non altérés par des courants de fond ou organismes fouisseurs. Ces deux conditions sont réunies en Mer Noire et au Lac de Van (Turquie). De ce fait, DEGENS, STOFFERS, GOLUBIC et DICKMAN (1978) ont pu compléter les travaux de ROSS et DEGENS (1974).

2.4.3.1. Les varves holocènes de la Mer Noire

Le cycle hydrologique, l'activité biologique des cours d'eau riverains, la variation de stratification thermique des eaux ainsi que la variation du niveau de compensation des carbonates et de l'interface $O_2 - H_2S$ (ROSS et DEGENS - 1975) sont responsables du dépôt de lamines baptisées "varves" par de nombreux auteurs.

Les varves holocènes de la Mer Noire montrent une alternance de lamines claires et sombres. Chaque doublet correspond à un cycle annuel de sédimentation. Les lamines claires représentent la précipitation de la calcite durant l'été et les lamines sombres la sédimentation hivernale d'unités sapropéliques. DEGENS et al. (1975) pensent que cette sédimentation s'est faite dans une eau tranquille de profondeur modérée. Les travaux de HAMMEN, WIJMSTRA et ZAGWIJN (1971) montrent que ces "varves" couvrent une période d'environ 500 000 ans ! A l'opposé des doublets qui correspondent à une sédimentation annuelle, des "mégavarves" ont été décrites. Elles se sédimentent en plusieurs années ou même en quelques centaines d'années.

Par des datations radiochronologiques, ROSS et DEGENS (1974) ont conclu que le taux de sédimentation fut uniforme depuis 7 000 ans (en moyenne 1 cm par siècle). Toutefois, DEGENS, PALUSKA et ERIKSSON ont remis en question la chronologie. En effet, ils ont trouvé, dans des sédiments récents, des débris charbonneux qui fournissaient des âges plus anciens de 2 000 à 3 000 ans. DEGENS et KEMPE (1978) ont montré que la sédimentation est très importante depuis 1 500 ans.

2.4.3.2 Les "varves" du lac de Van (Turquie)

DEGENS et KEMPE (1978) ont étudié les varves du lac de Van ainsi que leur signification pour la paléoclimatologie. Ce lac est situé dans l'Est de l'Anatolie. C'est le quatrième lac du monde par son volume, et le premier pour son taux de salinité (21 ‰).

Les différents prélèvements effectués sur le pourtour du lac sont de très bons enregistrements de son passé. Les corrélations entre les carottes ont pu être établies grâce à des couches-repères. L'analyse des carottes montre une augmentation du taux de sédimentation, dans les temps récents, en relation avec le développement de l'agriculture et de la déforestation. Pendant les époques glaciaires, le lac était à 70 m au-dessus de son niveau actuel. Un climat chaud et sec au début de l'Holocène le fit descendre à 340 m en dessous du niveau actuel, atteint vers 6 000 avant J.C.

Les "varves", décrites par DEGENS et KEMPE montrent cinq lames par an, dont deux sont fines et sombres, peut-être le résultat d'une intense activité planctonique au printemps et à l'automne. La sédimentation est influencée par le cycle hydrologique dans le bassin versant du Van. De décembre à février, la température de l'air reste en dessous de 0°C. Pendant cette période, les rivières sont alimentées uniquement par des eaux riches en Ca qui, arrivant dans le lac, provoquent une précipitation d'aragonite sur toute son étendue. Ainsi, se dépose en hiver une couche d'aragonite sur toute l'étendue du lac. Du fait de la fonte des neiges et des précipitations d'avril et mai, les rivières ont une activité érosive importante favorisant l'apport de matériaux détritiques.

D'année en année, l'augmentation de cet apport est responsable de l'épaississement des varves. De plus, KEMPE (1977) a montré que l'activité solaire était en partie responsable de la fluctuation de la cote du lac. Ainsi, l'étude des "varves" vers 7 000 avant J.C montre une périodicité correspondant à un cycle solaire de 10 ans.

Ces découvertes font apparaître l'interdépendance du système sédimentation-érosion - cycle de l'eau - activité solaire.

Les deux exemples précédents ont montré l'utilité des "varves" pour la reconstitution des conditions climatiques anciennes.

2.4.3.3. Les "varves" du Golfe Central de Californie.

Lors d'une campagne de sondages dans le cadre du "Deep Sea Drilling Project", un prélèvement fut effectué dans les sédiments du Golfe Central de Californie.

Les auteurs (SCHRADER et al., 1980) décrivent des faciès à lames en leur attribuant le nom de "varves". L'alternance saisonnière est enregistrée dans ces sédiments. Lors de la saison pluvieuse, du matériel terrigène provient du littoral et forme une lamine sombre. Lors de la saison sèche, les diatomées dominent et sont responsables d'une teinte plus claire. Ainsi, deux lames se déposent par an.

2.5. CONCLUSIONS : PROPOSITION D'UNE NOUVELLE TERMINOLOGIE

Par cette étude bibliographique, nous montrons que le mot "varve" est souvent utilisé de façon abusive c'est-à-dire dans un sens déformé de la définition originelle de DE GEER. Si on se reporte au "Glossary of Geology" (GARY, McAFFEE, WOLF - 1972), cette définition prévaut toujours : Une varve est donc une paire de lames déposée en une année dans un lac glaciaire ou périglaciaire. La lamine inférieure "d'été", silteuse ou sableuse, généralement claire est produite par une fonte rapide des neiges et glaces, et déposée par des courants d'inféroflux. Les argiles, riches en matière organique sont piégées au niveau du thermocline. Lors de l'inversion de la stratification thermique en hiver, elles se déposent en une lamine généralement sombre.

Un couple de lames ne peut être appelé "varve" que si la rythmicité annuelle est démontrée. Dans ce cas, les varves sont un outil géochronologique fiable. Des erreurs de datation peuvent intervenir lorsque la sédimentation argileuse d'hiver est interrompue par des apports détritiques, provoquant le dépôt de lames grossières interstratifiées dans la lamine argileuse.

Lorsque des phénomènes de courants de turbidité répétitifs interviennent du fait de crues successives notamment, on obtient de nombreuses lames pour une seule saison. On se trouve donc en contradiction avec la définition des varves. Nous proposons de ne conserver dans ce cas que le terme de "faciès à lames" pour décrire cette succession de niveaux de faible épaisseur.

Ce terme (faciès à lames) aurait pu être appliqué au sédiment que SCHWARZBACH (1940) a nommé à tort "varve annuelle", où il a compté jusqu'à 158 lames de 0,2 à 1 mm d'épaisseur pour une année. Selon WIERKE (1937) et SCHWARZBACH cette disposition est due à des fluctuations de quelques jours.

CAMPBELL (1967) définit les lamines comme des niveaux inférieurs à 20 cm d'épaisseur. INGRAM (1954) avait proposé de distinguer les lamines des lits par une limite placée à 1 cm. Le tableau 2.2. montre la correspondance de ces définitions.

INGRAM (1954)		épaisseur (cm)	CAMPBELL (1967)		
LITS	très épais		LITS	très épais	
	épais	100		épais	
	moyens	30 20		moyens	très épaisses
	fins	10		fins	épaisses
	très fins	3		très fins	moyennes
LAMINES	*	1	LAMINES		
	fines	0,3			
		0,1	très fines		

* il n'y a pas de nom spécial. Les lamines ne sont dites fines que lorsqu'elles sont comprises entre 0.1 et 0.3 cm.

Tableau 2.2 : Définition de "lamines" et "lits".

Nous proposons d'en appliquer le terme "faciès varvé" que pour une suite de couples annuels de lamines se formant hors des conditions climatiques proposées par la définition originelle du mot "varve". Nous avons en effet décrit des varves typiques par leur faciès, mais qui se sont formées hors des conditions de sédimentation glacio-lacustre.

Que ce soit en milieu lacustre, lagunaire ou marin, une sédimentation à rythmicité saisonnière engendre un faciès varvé c'est-à-dire le dépôt de deux lamines de teinte ou de granularité différentes par an.

Ainsi, les argiles glaciolacustres des paléolacs du Grésivaudan, (soit argiles d'Eybens étudiées par MONJUVENT - 1971 -, MONTJUVENT et USELLE - 1973 -, soit argiles du Trièves étudiées par MONJUVENT - 1971 -, HUFF - 1974 -) ne devraient plus être nommées "varves". On y observe bien une succession de lamines différenciables par leur teinte ou leur granularité, mais la rythmicité bimodale annuelle n'y a pas été mise en évidence.

Lors d'une étude réalisée dans le Trièves à l'occasion d'un glissement de terrain affectant ces argiles, nous avons pu constater une similitude de faciès avec les sédiments du lac de Chambon : il s'agit dans les deux cas d'une succession de lamines silto-argileuses séparées par des feuillets de phyllites orientées.

CHAPITRE 3 : SEDIMENTOLOGIE DES ALLUVIONS DU CHAMBON

3.1.: MORPHOLOGIE DES DEPOTS

3.2.: L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

3.3.: LES RESULTATS

3.4.: CONCLUSIONS

Cette étude a été réalisée dans le but de définir le type de transport responsable des dépôts dans le lac du Chambon.

3.1. - Morphologie des dépôts

La vidange de 1981 a permis une observation directe des sédiments accumulés dans l'ensemble de la retenue. Leur épaisseur variable peut être estimée au niveau des terrasses découpées par la Romanche ou le torrent de la Pisse. Les terrasses les plus élevées surmontent 8 mètre d'alluvions, sans que le substratum soit visible.

Une morphologie sous-lacustre typique peut être décrite (fig. 3.1 et 3.2)

3.1.1.- Le chenal

Sur toute la longueur du lac, un chenal permanent est entretenu. Ce phénomène a en particulier été décrit pour le lac Léman (SERRUYA, 1968). Il est accentué dans les lacs artificiels du fait des turbinages qui augmentent la vitesse des courants de fond (courants d'inféoflux).

Lors de la vidange, le chenal s'approfondit très rapidement, s'élargissant par un phénomène d'érosion régressive des terrasses. Lorsque le lac est plein, le chenal divague dans la retenue, comme le révèle la présence, dans les coupes des terrasses, de figures sédimentaires témoignant de courants de forte énergie.

3.1.2. - Les terrasses

Les dépôts s'épaississent de la périphérie vers le centre du lac, de telle sorte que leur accumulation aboutit à une surface subhorizontale qui se raccorde d'une rive à l'autre du chenal.

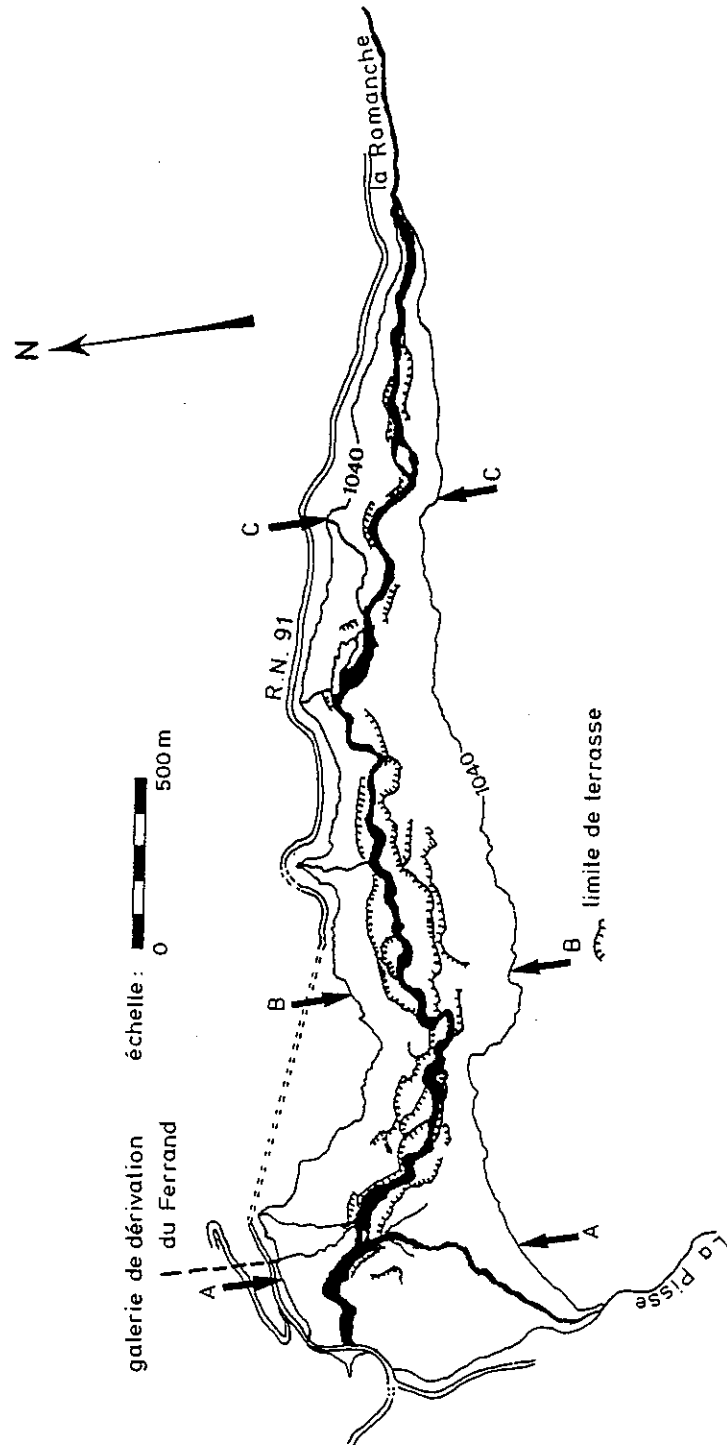


Figure 3.1. - Plan montrant la morphologie de la retenue du Chambron lors de la vidange de 1981.

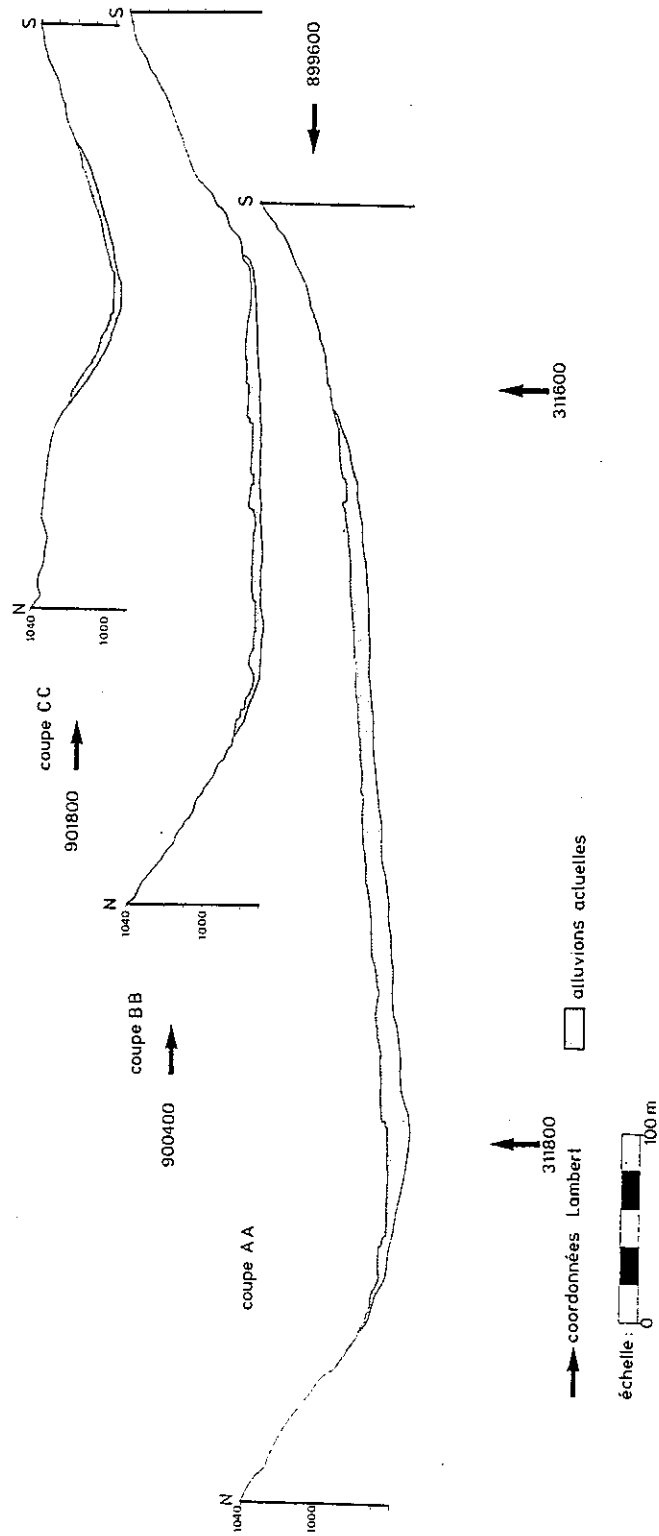


Figure 3.2. : Coupes montrant la morphologie de la retenue lors de la vidange de 1981.

Les dépôts étudiés montrent une succession de lamines généralement silteuses gris noir, exceptionnellement ocre, d'épaisseur variable (0,5 mm à plusieurs dizaines de cm). Quelques niveaux (toujours inférieurs à 3 mm) se distinguent par un grain très fin. Les niveaux argileux n'ont pas pu être séparés, pour l'analyse granulométrique, des lamines silto-sableuses qui les encadrent. Le contact est toujours brutal entre la lamine argileuse et la lamine supérieure, et progressif entre la lamine argileuse et la lamine inférieure.

3.1.3. - Le delta du torrent de la Pisse

Le torrent de la Pisse est responsable de la formation d'un delta de type digité, ou à chenalisation en doigts de gant. La partie sommitale du delta est constituée de chenaux divergents imbriqués.

En régime périglaciaire, de petits deltas sous-lacustres se forment facilement du fait de la charge importante des eaux de fonte des neiges et glaces.

Les différentes parties d'un delta ont été définies par GILBERT (1885): "topset, bottomset, bottomset". Chacun des termes constitutifs se retrouve dans le delta du torrent de la Pisse (Fig. 3.3.)

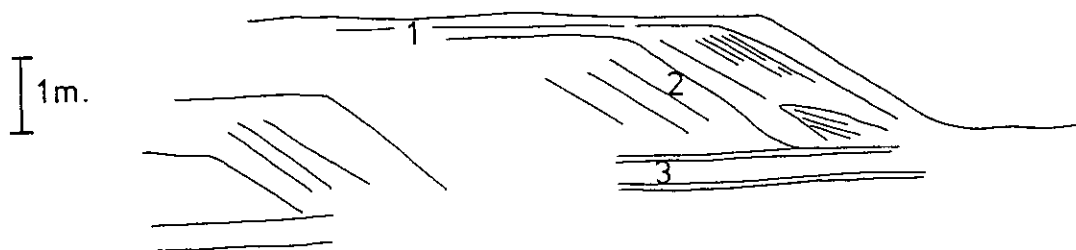


Figure 3.3. - Morphologie du delta du torrent de la Pisse

- 1 - couches sommitales ("topset")
- 2 - couches frontales ("frontset")
- 3 - couches basales ("bottomset")

Le matériau constitutif du delta est peu classé, hétérogène (argileux à graveleux).

Les couches sommitales ("topset") sont subhorizontales (1) puis s'inclinent d'environ 30° (2) lorsqu'on se dirige vers le centre du lac ("frontset"). Les couches basales ("bottomset"), horizontales, sont constituées d'un matériaux argilo-silteux présentant un faciès à lamines. La succession des couches frontales marque, au niveau de leur extrémité inférieure, la progression du delta sur la couche basale.

3.1.4. - Les figures sédimentaires

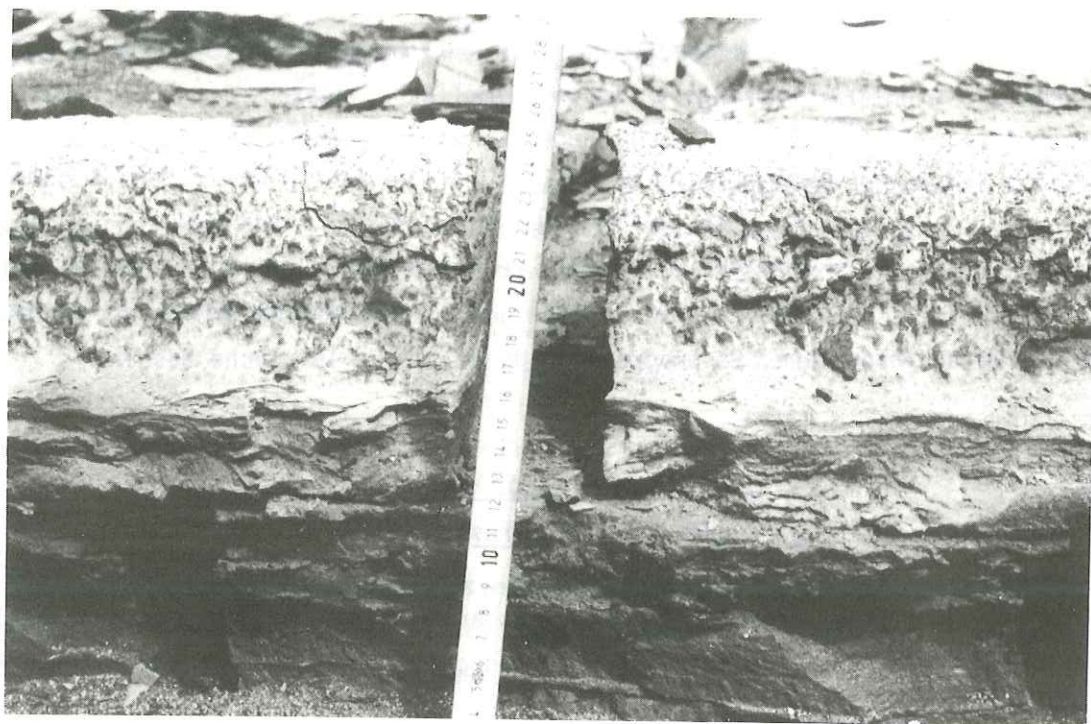
Nous avons privilégié les termes anglo-saxons car ceux-ci sont utilisés par tous les sédimentologues français. La traduction française est empruntée à PETITJOHN et POTTER (1964).

3.1.4.1. - Les "mud-cracks" (fentes de dessiccation)

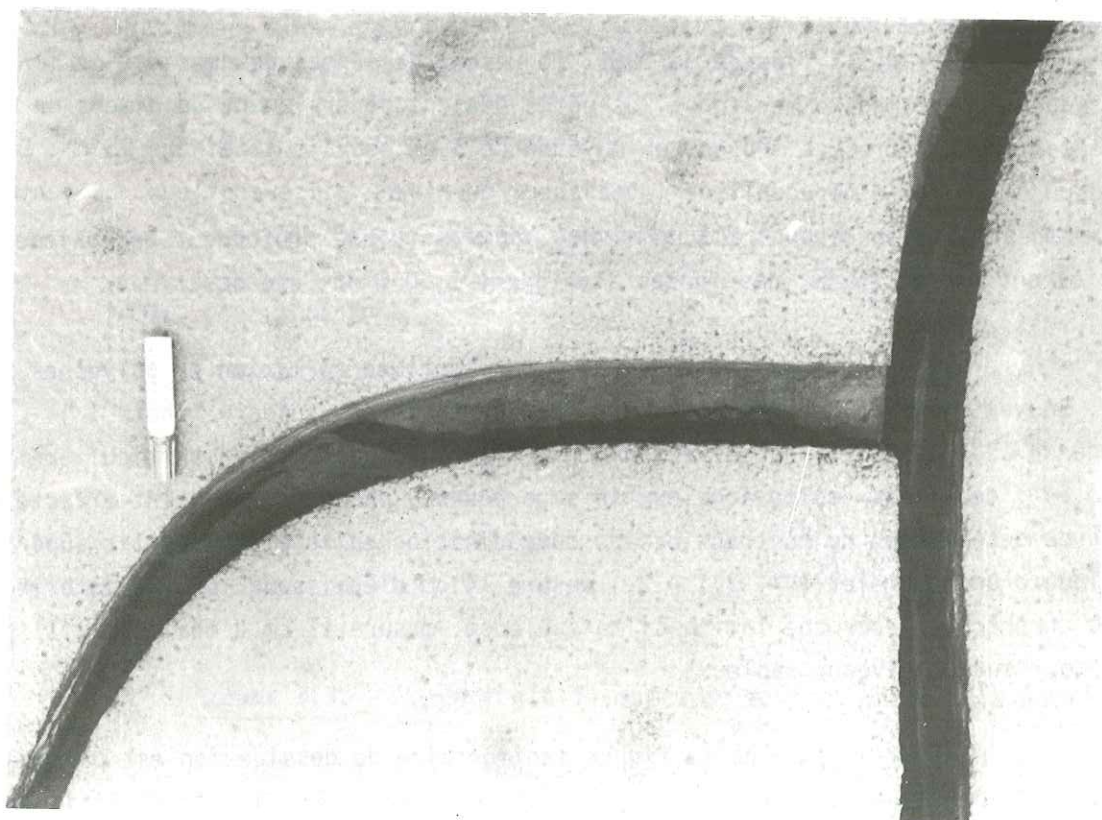
Lors de la vidange de 1981, le réseau de fentes de dessiccation montrait des polygones de grandes dimensions. Les côtés étaient généralement de dimension métrique. L'écartement entre les lèvres, en moyenne de 5 cm pouvait atteindre 15 cm. La profondeur de la fente dépendait de l'épaisseur du niveau silto-argileux. La fente s'interrompait si elle rencontrait un niveau sableux. D'une profondeur généralement comprise entre 5 et 20 cm, des fentes atteignant 1,50 m ont été observées.

Les fentes ne montraient que rarement une formation en polygones réguliers. Souvent même, elles pouvaient prendre une forme sinusoïdale (photo.1). La vidange de 1981 a permis l'observation d'une figure de dessiccation particulière (photo.2) : deux lits silto-argileux se superposent, chacun d'eux étant affecté de fentes de dessiccation ne montrant pas de communication entre elles. Le lit supérieur, constitué d'un bourrelet (cf. 3.1.4.2.) mesure 14 cm d'épaisseur. Le lit inférieur séparé du précédent par une lamine silto-sableuse, mesure 11 cm d'épaisseur. Il repose à son tour sur un niveau sableux.

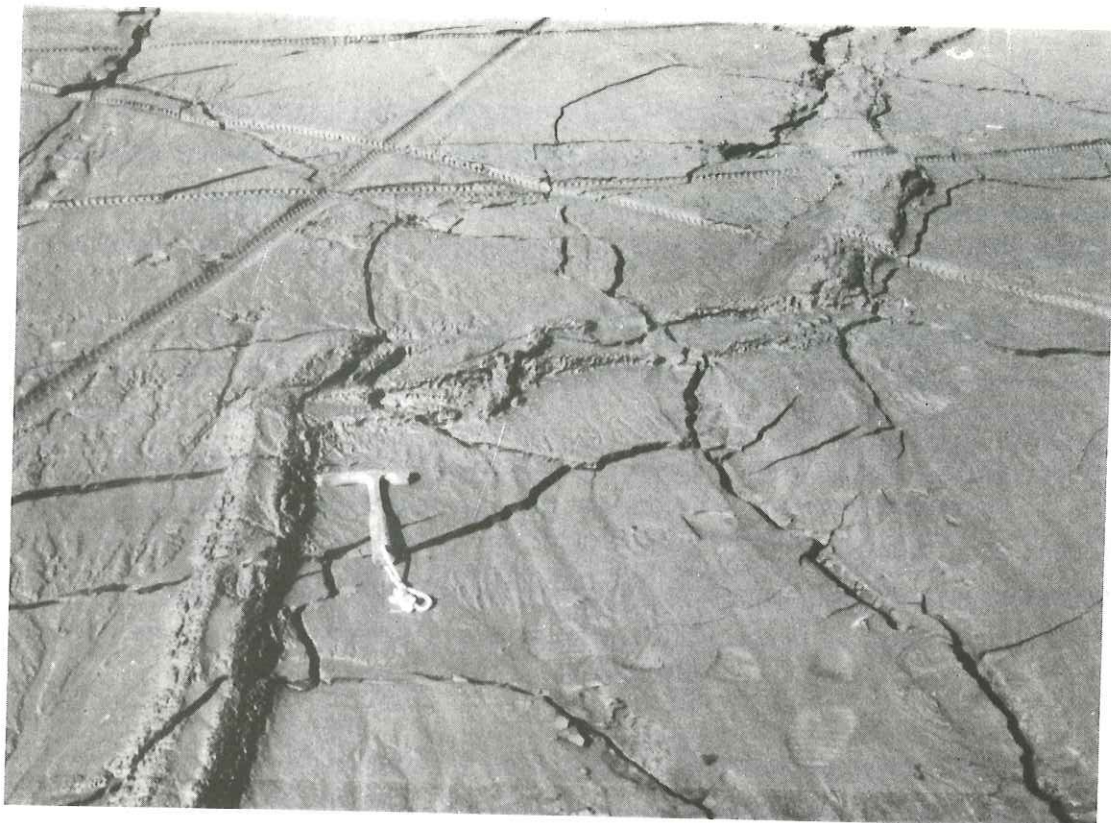
La genèse de cette figure sédimentaire de dessiccation est particulière. Les fentes supérieures et inférieures ne se correspondant pas, il est difficilement concevable que le niveau inférieur ait pu se fendre précisément en cet endroit, sous la



Photographie 1. - Superposition de deux couches silto-argileuses affectées de "mud-cracks". La couche supérieure est constituée d'un bourrelet.



Photographie 2. - "Mud-cracks".



Photographie 3. -

Bourrelet à la surface d'une
terrasse alluviale.



Photographie 4 -

Coupe d'un bourrelet surmontant
un "mud-crack".

protection d'une couche de 14 cm d'argile. Il est admis que lorsqu'une masse argileuse forme des fentes de dessiccation, celles-ci progressent de façon continue tant que dure la sécheresse et tant que le matériau est argileux. Si celui-ci devient sableux, la fente s'interrompt.

Cette précision permet d'affirmer que, si les lits supérieur et inférieur avaient subi le même stade de dessiccation, la fente aurait progressé régulièrement jusqu'au niveau sableux basal.

Nous émettons donc l'hypothèse que les fentes de dessiccation du lit inférieur doivent être attribuées à la vidange de 1980. Le lit supérieur représente alors la sédimentation entre les vidanges de 1980 et 1981. Cette hypothèse peut aussi s'étayer par le fait que la fente de dessiccation inférieure se poursuit sous la couche supérieure.

Les fentes de dessiccation datées de la vidange de 1980 n'ont pas pu rester ouvertes lors la remise en eau. Leur fermeture doit provenir du gonflement du matériau par augmentation de la teneur en eau. Il faut donc admettre que les alluvions ont gardé l'empreinte de la discontinuité. Les fentes de dessiccation se seraient ouvertes à nouveau selon la géométrie de ces discontinuités.

Lors de la vidange de 1982, le réseau de fentes de dessiccation était de dimensions moindres. Les côtés des polygones étaient décimétriques, la largeur entre les lèvres des fentes étant centimétrique. La profondeur des fentes étant superficielle, il n'a pas été possible de retrouver la figure sédimentaire décrite précédemment.

3.1.4.2. - Les bourrelets :

Lors de la vidange de 1981, la surface du fond de la retenue a montré une figure sédimentaire dont la genèse reste hypothétique. Des bourrelets d'une épaisseur d'environ 15 cm ont dessiné un réseau polygonal (photo.3. et 4.). Les côtés des polygones étaient métriques et décamétriques. Leur disposition était quelconque par rapport à la pente. Le tracé du bourrelet pouvait montrer des formes particulières : rectiligne, sinusoïdale, anguleuse, en baïonnette. Cela exclue une mise en place par glissement d'un matériau hydroplastique. Par ailleurs, on ne peut pas mettre en évidence une relation entre les bourrelets et les fentes de dessiccation.

Nous ayions en effet émis l'hypothèse suivante, Lors de la remise en eau consécutive à la vidange de 1980, les fentes auraient pu se combler rapidement. Puis le matériau se saturant, les fentes se seraient refermées en extrudant leur remplissage. Or, nous avons pu observer des bourrelets perpendiculaires aux fentes (photo.2.)

L'étude granulométrique a montré que le matériau constitutif du bourrelet est de même nature que l'encaissant. En effet, elle peut être comparée à celle faite sur le prélèvement C23. Celui-ci correspond à la sédimentation entre les vidanges de 1980 et 1981. La courbe granulométrique du bourrelet se situe du côté grossier du fuseau C23 ; ses paramètres sont les suivants (en phi) * :

- médiane (Me) : 5.8
- moyenne (Mz) : 5.9
- déviation standard $\sigma_1 = 1,3$
- asymétrie (Sk₁) : 0.17

Ces caractéristiques sont celles d'un matériau faiblement classé à asymétrie faiblement positive.

Les valeurs du percentile 1 et de la médiane reportées dans le diagramme de PASSEGA forment un point sur la section RS du "S" du diagramme, ce qui correspond à une "suspension uniforme dans un courant de turbidité",

Ceci indiquerait un dépôt par courant d'inféorflux de faible énergie.

L'ensemble de cette description et des paramètres granulométriques ne

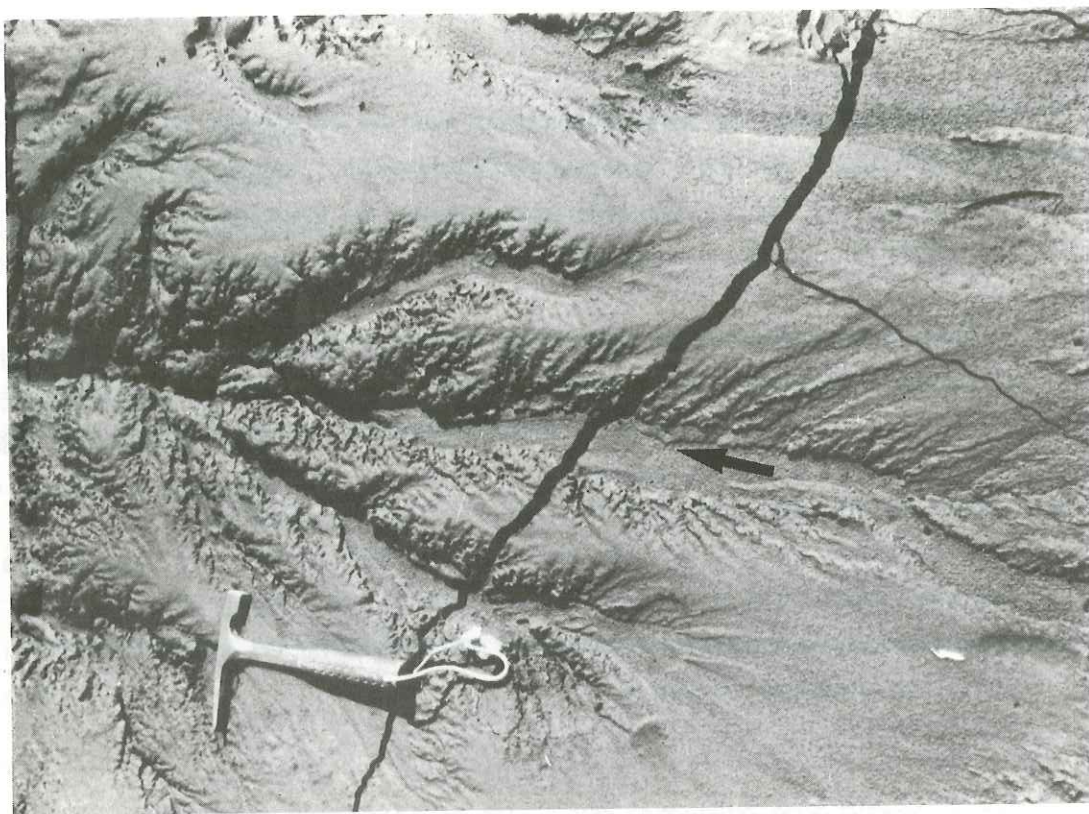
L'ensemble de cette description et des paramètres granulométriques ne nous permettent pas de conclure quant à l'agent de formation des bourrelets.

3.1.4.3. - Les "frondescant-casts"

TEN HAFF (1959) a décrit les "frondescant-casts" comme suit :

" moulages aplatis, généralement longs de plusieurs décimètres, et qui ressemblent à certaines plantes arbustives, ou à une grande feuille de chou. Le "feuillage s'étale toujours dans le sens des fronts du delta du torrent de la Pisse, le réseau s'étalant à partir de la rupture de la pente (photo. 5.)

* Les paramètres granulométriques sont définis au paragraphe 3.2.1.1



Photographie 5. : "Frondescent-casts". La flèche indique le sens du courant.



Photographie 6. : "Ripple-marks". La flèche indique le sens du courant.

3.1.4.4. - Les "bird-eyes"

Ils apparaissent ici comme des protubérances circulaires, centimétriques, creuses, mises en place par le dégagement gazeux dû à la décomposition des matériaux organiques. Le gaz ne pouvant s'échapper, des cloques se forment à la surface des terrasses alluviales.

3.1.4.5. - Les "ripple-marks" (rides de plage)

Les rides ont été observées à proximité du lit de la Romanche, donc dans les niveaux les plus profonds de la retenue. Elles sont de deux types :

- lingoïde : (REINECK et SINGH, 1973). Leur crête discontinue ne peut pas se suivre sur de longues distances (photo.6.). Elles sont produites par un courant unidirectionnel à la surface d'un matériau sans cohésion. SIMONS et al. (1965) estiment que le diamètre moyen des particules doit être inférieur à 0,60 mm pour que ce phénomène puisse se produire. Bien que n'ayant pas effectué d'analyse granulométrique sur ce matériau, on peut estimer, par comparaison visuelle avec les échantillons dont l'étude granulométrique a été faite, que nous sommes nettement en dessous de cette limite ;

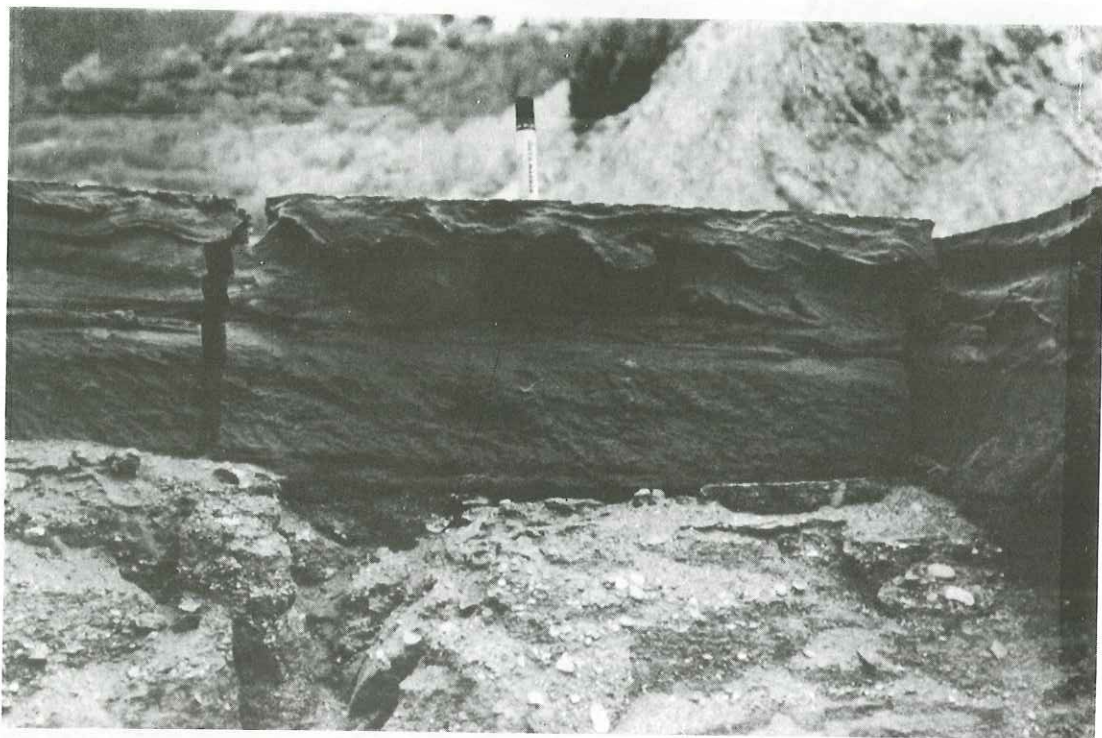
- ondulé à crête continue : (ALLEN, 1968). La crête peut se suivre sur plusieurs mètres. Les ondulations peuvent se présenter en phase.

Le premier type nécessite des courants de plus forte énergie que le second type (REINECK et SINGH, 1973).

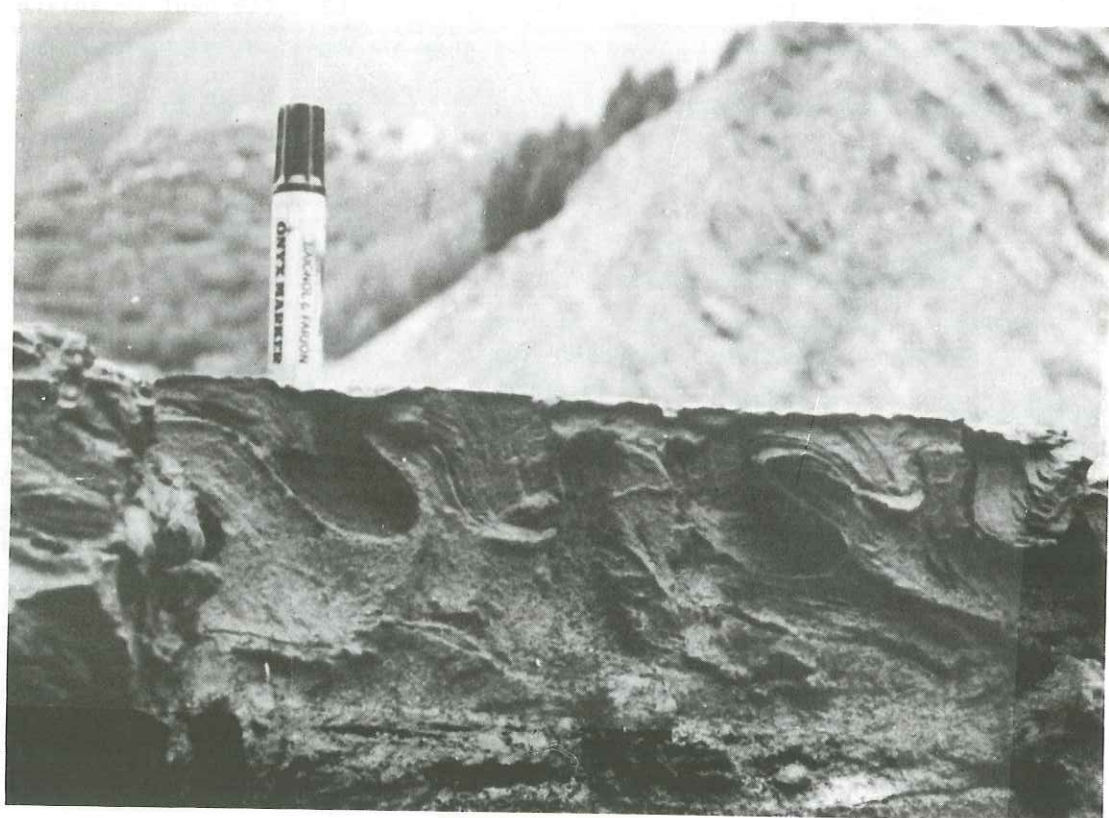
3.1.4.6. - Les convolutes

Ce terme décrit des couches de lamines plissées (photo.7 et 8). Elles apparaissent lorsque le matériau est très hydroplastique. Si les auteurs sont d'accord sur cette nécessité, leurs avis divergent à propos de l'agent provoquant le plissement du matériau. SANDERS (1965) y voit l'intervention de très forts courants de turbidité plissant la couche après l'avoir décollée. (KUENEN, 1953) estime qu'elles se forment à partir de "ripple-marks". Cette géométrie provoquerait un effet d'aspiration au-dessus des crêtes et de pression dans les creux.

Par ailleurs, Mc KEE et GOLDBERG (1969) ont pu produire de façon expérimentale des convolutes par l'action de pressions différentielles engendrées par du sable sus-jacent.



Photographie 7. - Convolutes.



Photographie 8. - Convolutes.

Pour ce qui est de nos observations, les convolutes forment le niveau supérieur de la couche. Elles ne sont donc pas le résultat de pressions différentielles engendrées par un matériau sus-jacent.

Les deux autres hypothèses restent plausibles, Celle faisant intervenir l'action d'un courant sur un matériau hydroplastique est satisfaisante, car la vidange provoque des courants importants dans la retenue. De même pour l'hypothèse s'appuyant sur des "ripple-marks" préliminaires, car ceux-ci ont en effet pu se produire lors de la vidange précédente. De plus, l'épaisseur des "convolutes" est sensiblement la même que celle du dépôt entre les deux dernières vidanges, ce qui conforterait cette dernière hypothèse. On peut aussi envisager une mise en place à partir de "ripple-marks" facilitée par l'action d'un courant sur un matériau hydroplastique, aucun fait ne venant contredire l'une ou l'autre des hypothèses précédentes.

3.2. - L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

3.2.1. - La méthode

3.2.1.1. - Les techniques

Cette étude a nécessité 130 tamisages et 120 densimétries. Son but était de déterminer les caractéristiques granulométriques des sédiments, leurs variations dans le temps (sur la hauteur d'une coupe) et dans l'espace (en différents points de la retenue).

L'étude granulométrique a consisté à tamiser les échantillons jusqu'à 63 microns. Le tamisage s'est fait sous l'eau pour permettre une bonne séparation des particules fines. Dans un deuxième temps, la colonne de tamis a été placée sur une secoueuse après un séjour de 24 heures à l'étuve à 105 °C. Les tamis sont ceux de la norme AFNOR X 11 501, c'est à dire à maille carrée de progression $r = \sqrt[10]{10} = 1,259$.

L'étude sédimentométrique, sur la fraction inférieure à 63 microns, a été réalisée par le laboratoire de géologie de l'Université de Genève à l'aide d'un Coulter Analyser Coultronic.

Principe du Coulter Analyser : l'échantillon préalablement défloculé et agité par ultrasons, est mis en suspension dans un électrolyte. Le déplacement des particules provoque une variation du champ électrique permettant de calculer les

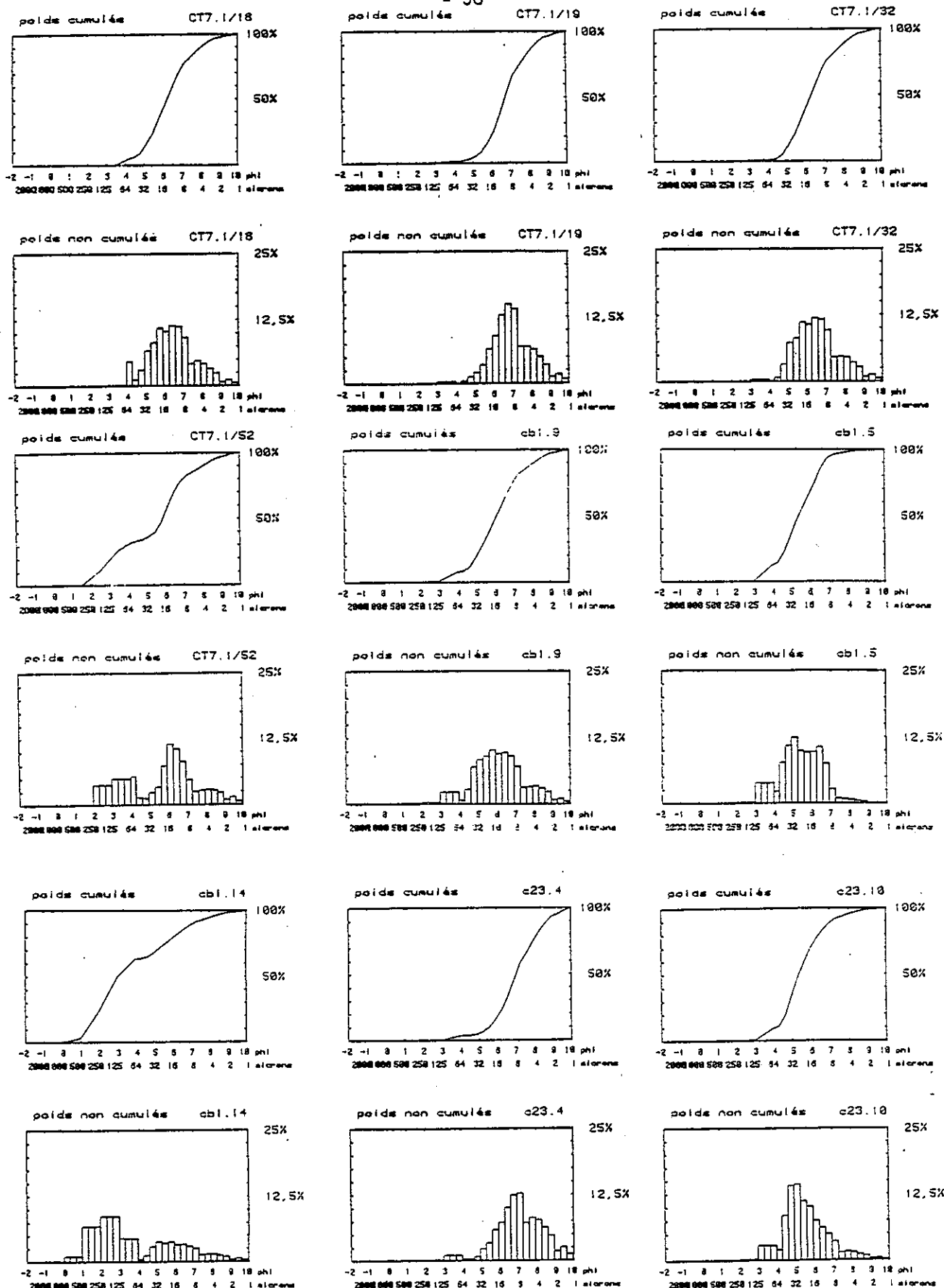


Figure 3.4. - Histogrammes de fréquence simple et courbes cumulatives en ordonnée arithmétique montrant l'appauvrissement du canal 5 phi correspondant à la séparation entre le tamisage et la sédimentométrie.

volumes des particules ramenées à des sphères équivalentes.

Les données du tamisage ont été intégrées pour que les courbes cumulatives et les histogrammes puissent être tracés par l'ordinateur. Les pourcentages en argile, silt, sable, gravier, le diamètre moyen, l'asymétrie et l'aplatissement ont pu être ainsi calculés.

Le choix de la technique d'étude des particules inférieures à 63 microns a été guidé par un critère de rapidité d'exécution. Il n'était pas possible d'effectuer la densimétrie classique sur 120 échantillons car par cette méthode, on ne pouvait traiter que 6 échantillons par semaine.* Le deuxième critère de choix fut la possibilité de réaliser des granulométries sur de très faibles quantités de matériaux, ce qui était indispensable pour déterminer les caractéristiques sédimentologiques de chaque lamine.

Les résultats des analyses sont exprimés selon différentes représentations :

- courbes cumulatives à partir des éléments grossiers, en ordonnée arithmétique ;
- courbes cumulatives à partir des éléments grossiers, en ordonnée de probabilité ;
- diagrammes triangulaires (argile, silt, sable)
- histogrammes de fréquence simple.

On remarque sur les histogrammes (fig. 3.4.) un appauvrissement du canal 4 phi, se traduisant par un palier sur certaines des courbes cumulatives. Cela correspond à la coupure granulométrique entre le tamisage et l'analyse du Coulter-Analyser.

3.2.1.2. - Les paramètres utilisés en granulométrie

3.2.1.2.1. - Les classifications granulométriques

La définition des termes utilisés est très importante pour la compréhension des phénomènes. Prenons l'exemple du mot argile. Pour certains, ce mot évoque une classe

* Une étude comparative de ces deux techniques sédimentologiques est exposée en annexe.

Diamètre des particules		SHEPARD (phi)	WENTWORTH (phi)			ATTERBERG (mm)		
mm	unités phi							
2048	— - 11	Graviers	très grossiers	Blocs "boulders"	Graviers	Enrochements		
1024	— - 10		grossiers					
512	— - 9		moyens					
256	— - 8		fins					
128	— - 7		grossiers	"Cobbles"		200		
64	— - 6		fins			Cailloux		
32	— - 5		très grossiers	Galets "Pebbles"		20		
16	— - 4		grossiers					
8	— - 3		moyens			Graviers		
4	— - 2		fins					
2	— - 1		très fins			2		
1	— 0		Sables	très grossiers		Sables "sands"		Sables grossiers
0,5	+ 1			grossiers				
0,25	+ 2			moyens				Sables fins
0,125	+ 3	fins						
0,062	+ 4	très fins						
0,031	+ 5	Silts	très grossiers	Silts	Boue	0,02		
0,016	+ 6		grossiers				Limons	
0,008	+ 7		moyens					
0,004	+ 8		fins					
0,002	+ 9	Argile	très fins	0,002				
			Argile			Argile		

Tableau 3.1 - Classifications granulométriques, selon SHEPARD, WENTWORTH et ATTERBERG.
Correspondance entre l'échelle millimétrique et celle des phi.

granulométrie inférieure à une certaine dimension. Pour d'autres, il est associé à des propriétés mécaniques particulières (plasticité). Pour les minéralogistes enfin, les argiles sont définies comme une famille de phyllosilicates,

Nous approfondirons la définition granulométrique de ce terme.

La coupure granulométrique se fait, selon les auteurs à 2 ou 4 μ . WENTWORTH (1922) et ATTERBERG (1905) sont partisans de la coupure à 2 μ . Quant à nous, à la suite de SHEPARD (1954), nous avons adopté la coupure à 4 μ .

Par ailleurs, WENTWORTH a préconisé l'emploi d'une échelle particulière pour les classes granulométriques : l'échelle en ϕ .

Elle s'établit en prenant le logarithme négatif en base 2 de l'échelle métrique ($\phi = -\log_2 d$), où d est le diamètre moyen des particules en mm. Le tableau 3. 1. indique la correspondance entre les deux échelles dimensionnelles ainsi qu'avec les classifications de WENTWORTH, ATTERBERG et SHEPARD.

L'exploitation des courbes granulométriques peut se faire par deux approches : la statistique et les paramètres déduits des graphiques.

3.2.1.2.2. - La statistique

L'approche statistique est facilitée par l'emploi d'ordinateurs. Le programme utilisé au laboratoire de sédimentologie de l'Université de Genève à partir des résultats d'analyses de nos échantillons permettait d'obtenir les courbes granulométriques en fréquences cumulées, les histogrammes en fréquences simple, les pourcentages en gravier, sable, silt, argile (selon la classification de SHEPARD), le diamètre moyen, l'écart-type, l'asymétrie, l'aplatissement (selon COAKLEY et BEAL, 1971). Ces derniers paramètres correspondent respectivement aux moments d'ordre 1, 2, 3 et 4 de la statistique (tableau 3.2).

3.2.1.2.3. - Les paramètres déduits des graphiques

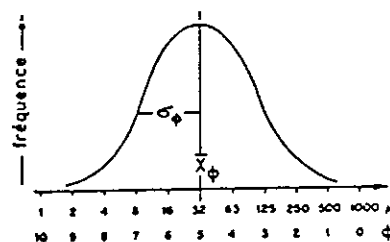
De nombreux auteurs ont attaché leur nom à des paramètres granulométriques

DIAMÈTRE MOYEN

$$\bar{x}_\phi = \frac{1}{N} \sum p_i x_i$$

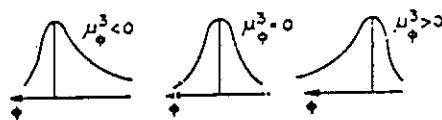
ÉCART TYPE

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum p_i (x_i - \bar{x}_\phi)^2}{N-1}}$$



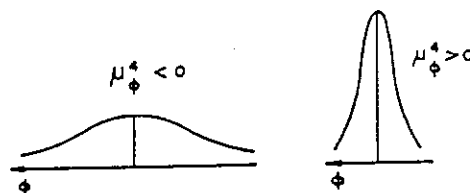
COEFFICIENT *
D'ASYMÉTRIE

$$\mu_\phi^3 = \frac{\sum p_i (x_i - \bar{x}_\phi)^3}{2 \sigma_\phi^3 (N-2)}$$



COEFFICIENT *
D'APLATISSEMENT

$$\mu_\phi^4 = \frac{\sum p_i (x_i - \bar{x}_\phi)^4}{\sigma_\phi^4 (N-4)} - 3$$



x_i : diamètre en ϕ ($\log_2 d_i$)

p_i : poids de la fraction comprise entre $[x_{i-1}, x_i]$

N : poids total ($\sum p_i$)

* d'après COAKLEY et BEAL (1971)

Tableau 3.2 - Formulation et signification des principaux paramètres granulométriques statistiques.

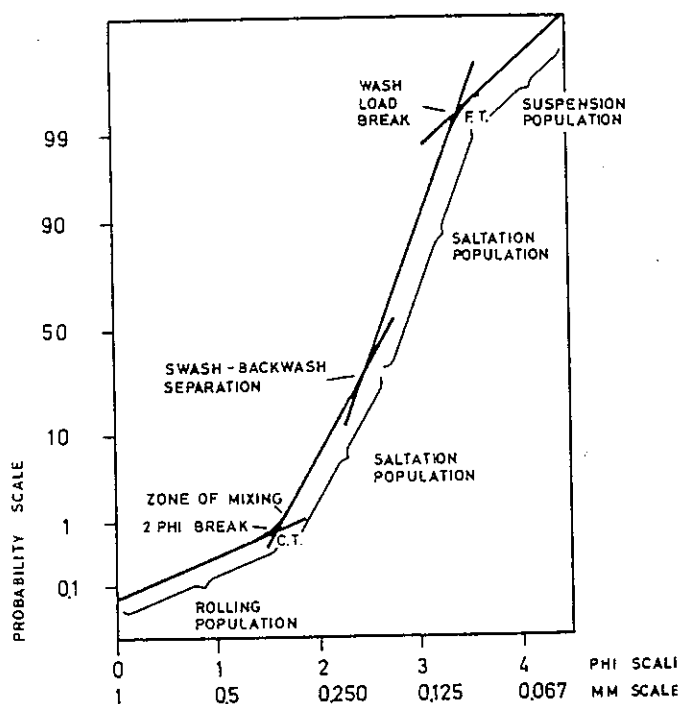
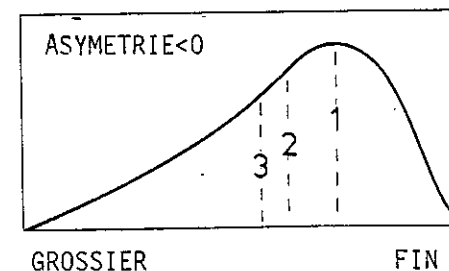
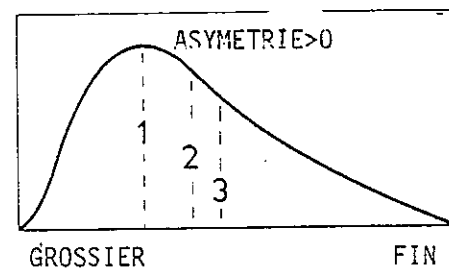
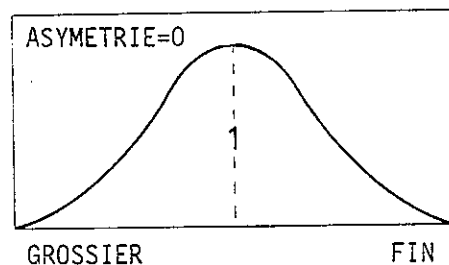


Figure 3.6 - Signification des courbes cumulatives en ordonnée de probabilité - (VISHNER, 1969).

POIDS CUMULES (en pourcentage)



DIAMÈTRE DES PARTICULES

Figure 3.5 - Signification de l'asymétrie - 1 - mode, 2 - médiane, 3 - moyenne.

Nous avons utilisé ceux de FOLK et WARD (1957) : la moyenne ou "mean phi", la déviation standard ou "standard déviation", l'asymétrie de distribution ou "inclusive graphic skewness". Ceux-ci ont la même signification que les moments d'ordre 1, 2 et 3 de la statistique.

Un autre paramètre a été utilisé : la médiane (Me) (TRASK, 1930).

Le calcul de ces paramètres nécessite la détermination des percentiles P_5 , P_{16} , P_{50} , P_{84} , P_{95} . Ce sont les dimensions des grains, lues aux ordonnées 5, 16, 50, 84, 95 % des courbes cumulatives.

$$\text{la médiane (Me)} = P_{50}$$

$$\text{la moyenne (Mz)} = \frac{P_{16} + P_{50} + P_{84}}{3}$$

$$\text{la déviation standard } (\sigma_1) = \frac{P_{84} - P_{16}}{4} + \frac{P_{95} - P_5}{6.6}$$

$$\text{l'asymétrie de distribution (SK}_1\text{)} =$$

$$\frac{P_{84} + P_{16} - 2 P_{50}}{2 (P_{84} - P_{16})} + \frac{P_{95} + P_5 - 2 P_{50}}{2 (P_{95} - P_5)}$$

La position de la médiane par rapport à la moyenne détermine l'asymétrie (fig. 3.5.).

L'assymétrie positive correspond à un classement maximal du côté des éléments grossiers et inversement.

La signification des valeurs de la déviation standard permet l'interprétation suivante.

. inférieure à 0,35	: très bien classé
. 0,35 à 0,5	: bien classé
. 0,5 à 0,8	: assez bien classé
. 0,8 à 1,4	: moyennement classé
. 1,4 à 2	: faiblement classé
. 2 à 2,6	: mal classé
. supérieure à 2,6	: très mal classé

Ces différents paramètres quantifient donc la forme des courbes granulométriques.

On doit à VISHNER (1969) l'utilisation des courbes en ordonnées de probabilité pour expliquer la mode de transport du sédiment (fig. 3.6.). Chaque segment de la courbe correspond à un mode de transport particulier.

Les paramètres granulométriques peuvent être combinés pour déterminer le mode de transport et l'origine des sédiments (MASON et FOLK, 1958 ; FRIEDMAN, 1961).

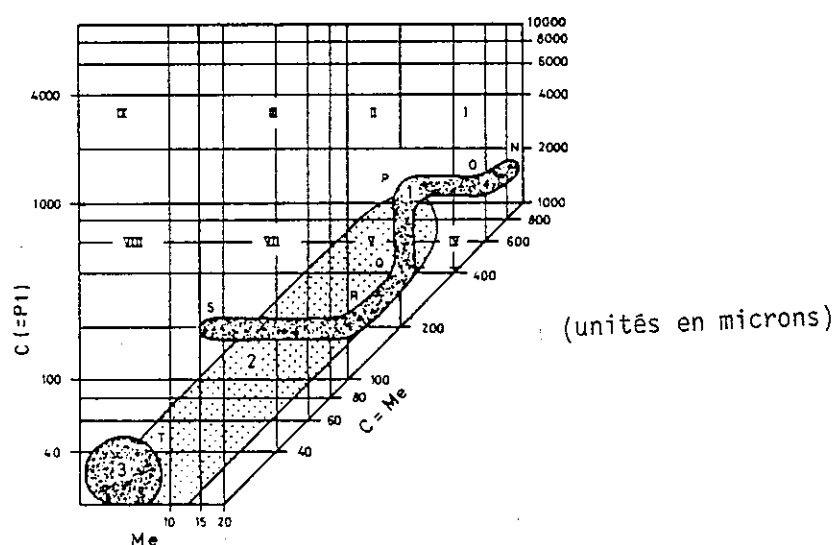


Figure 3.7. - Diagramme de PASSEGA

PASSEGA (1957) a suggéré d'utiliser le rapport C/Me pour interpréter les mécanismes de mise en place des sédiments, C étant le percentile 1 (c'est à dire approximativement la valeur de la granulométrie la plus grossière) et Me la médiane.

L'interprétation résulte du découpage du diagramme en zones correspondant à des modes de dépôt distinctes (fig. 3.7.). L'une de ces zones (1) a la forme d'un "S". Elle peut être divisée de la façon suivante :

Segments du diagramme

Modes de dépôt

NO

Sédiments roulés

OP

Sédiments roulés avec quelques particules en suspension

PQ

Suspensions granoclassées avec quelques particules roulées

QR

Suspensions granoclassées : "saltation"

RS

Suspensions uniformes

Deux autres zones sont délimitées sur le diagramme. L'une (2) est parallèle à la limite C = Me et concerne les dépôts par courants de turbidité.

La zone inférieure du diagramme (3) caractérise les sédiments transportés en suspension et déposés par décantation dans une eau calme.

Echantillon N°	Sable %	Silt %	Argile %	Médiane (phi)	Diamètre moyen-(phi)	Asymétrie (phi)	Aplatissement (phi)
1	59	36	4	3,4	3,9	0,14	- 0,28
2	25,5	68,5	6	5,1	5,05	- 0,04	0,60
3	3,5	81,5	15	6,3	0,45	- 0,002	- 0,93
4	17,5	76,5	6	5,25	5,4	0,25	0,11
5	12,5	85,5	2	5,5	5,45	0,05	0,18
6	8,5	91,5	0,2	5,5	5,4	0,47	1,82
7	2	74,5	23,5	6,6	6,7	0,04	- 0,52
8	4,5	75	21	6,55	6,7	- 0,02	0,05
9	8	80,5	11,5	6,15	6,1	0,04	0,12
10	12	81,5	6,5	5,5	5,6	0,2	0,32
11	9,5	76	14,5	6,2	6,2	0,002	- 0,16
12	54	43	3	3,85	4	0,29	- 0,006
13	24,5	70	5,5	5,1	5,2	0,15	0,29
14	63,5	31	5,5	3	3,8	0,35	- 0,47
15	63	34,5	2,5	3	3,4	0,37	0,05
16	23	71,5	5,5	5,25	5,2	0,11	- 0,07
17	32,5	61,5	6	5,15	5	- 0,001	- 0,58
18	58,5	37,5	4	3,3	3,9	0,29	- 0,59
19	33	60,5	6,5	5,25	5	- 0,003	- 0,54
20	58	36,5	5,5	3,7	4,2	0,3	- 0,49
21	64,5	33	2,5	3,05	3,6	0,37	- 0,09
22	24	69	7	5,25	5,3	0,1	- 0,22
23	36	56	8	5,25	5,2	0,1	- 0,81
24	27	68,5	4,5	5	5,1	0,23	0,2

Tableau 3.3. - Paramètres granulométriques du prélèvement CB1.

3.3. - LES RESULTATS

L'ensemble des prélèvements cités sont situés sur la figure 3.8.

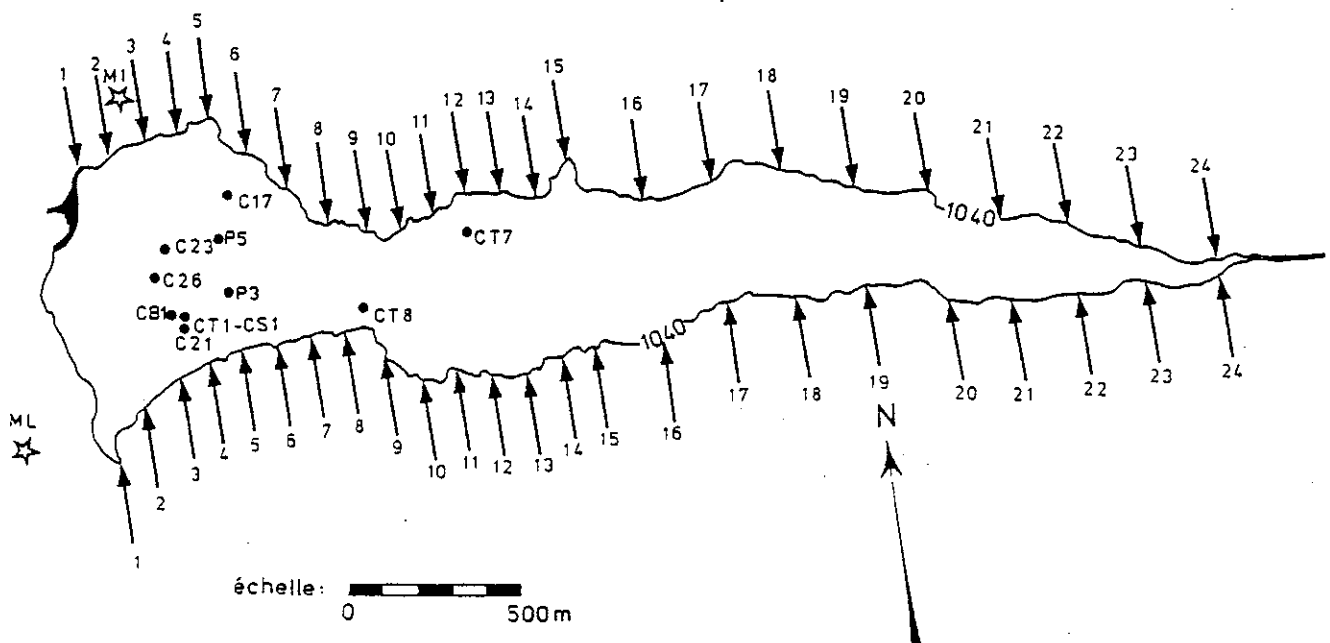


Figure 3.8. - Localisation des prélèvements et des coupes de la figure 5.2.

3.3.1. - Les prélèvements CT1 et CB1

Le prélèvement CT1 est situé en rive gauche de la Romanche, en rive droite du torrent de la Pisse, en aval du delta (fig. 3.8.).

A la base de CT1 (2,10 m de haut), la présence du paléosol (graviers dans une matrice ocre) indique que ce prélèvement correspond à la totalité de la sédimentation en ce point, depuis la première mise en eau (1935). Ainsi, on peut estimer que le taux d'alluvionnement y est d'environ 4,5 cm par an.

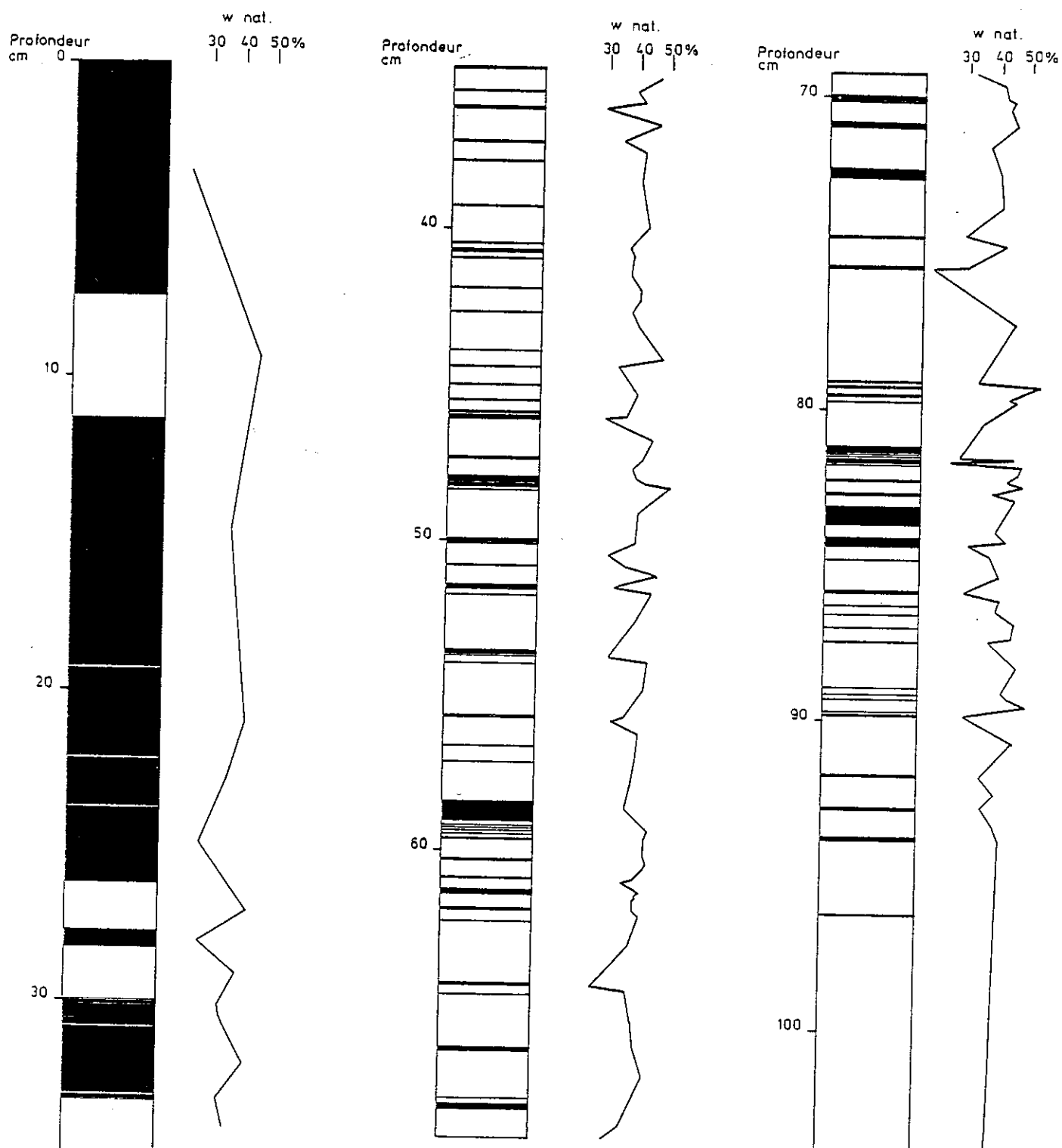
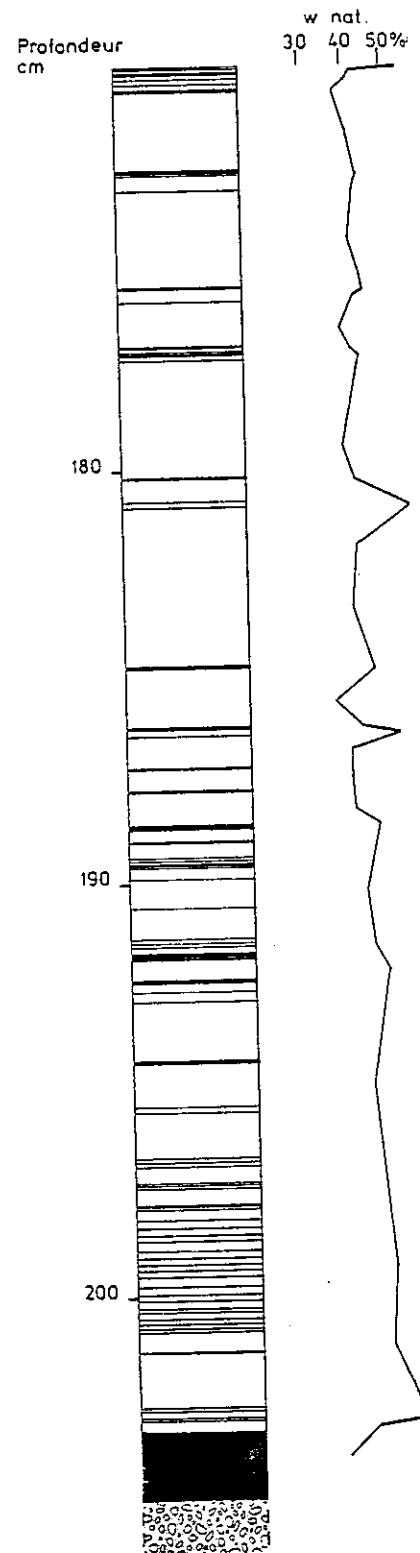
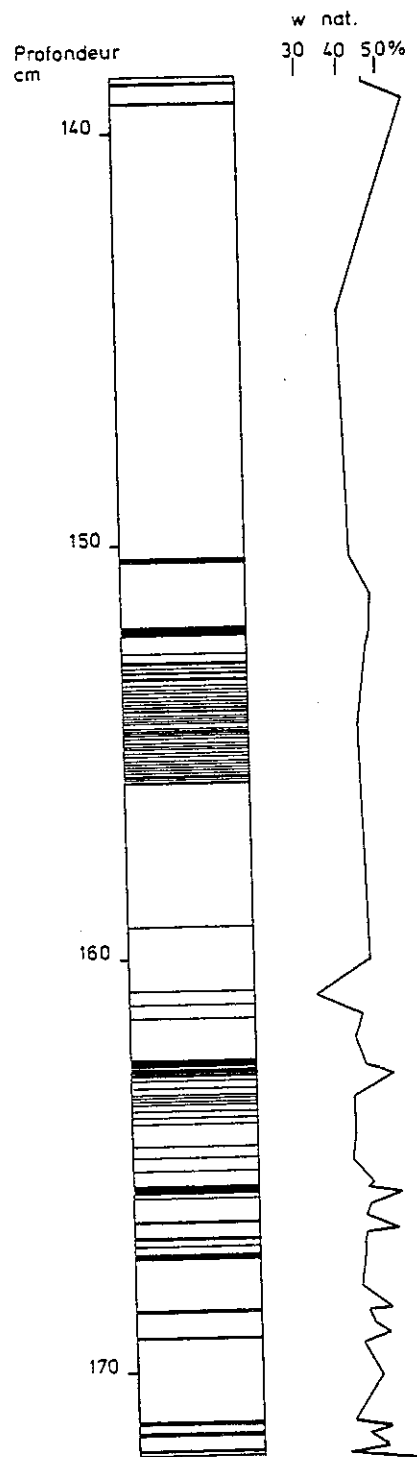
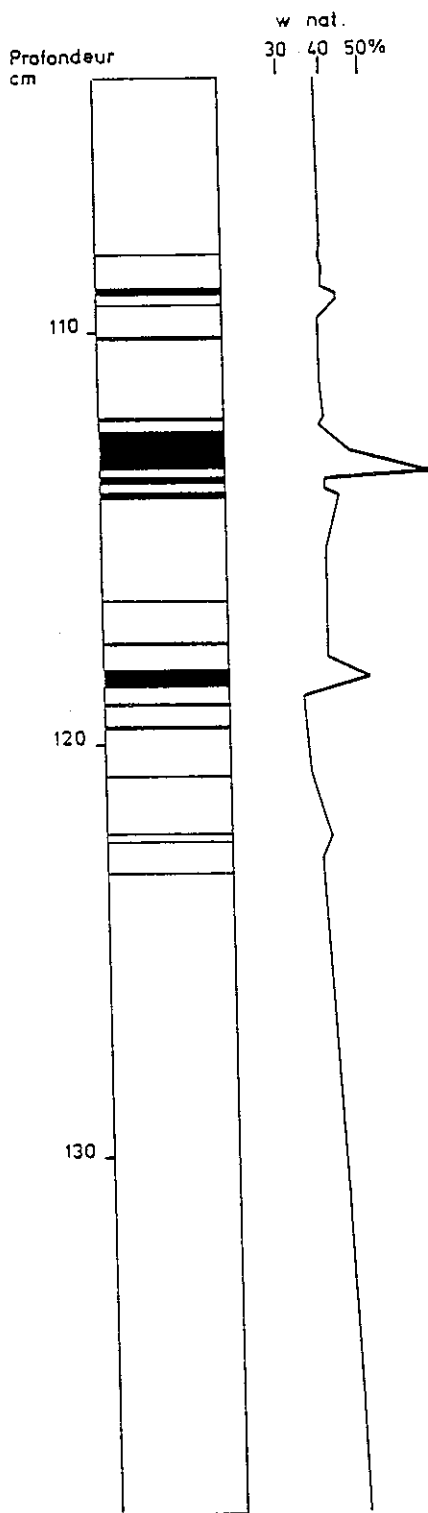


Figure 3.9. - Coupe détaillée et teneurs naturelles en eau du prélèvement CT1.



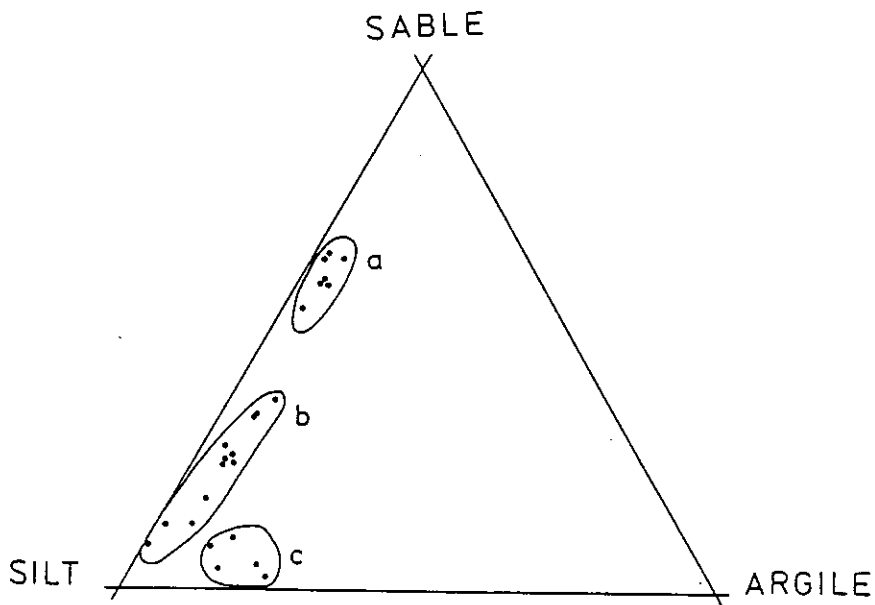
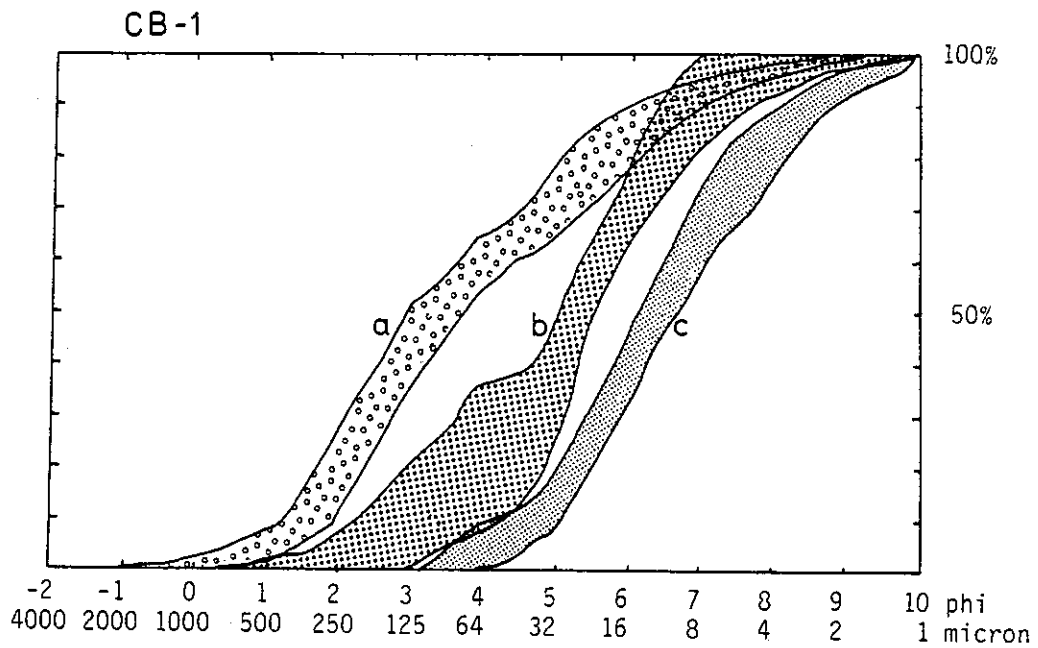


Figure 3.10. - Granulométrie du prélèvement CB1: courbes cumulatives en ordonnée arithmétique et diagramme triangulaire (argile, silt, sable).

520 lamines silto-argileuses ou silto-sableuses se succèdent (fig. 3.9), soit une moyenne d'environ 12 par an .

Ainsi, il n'est pas possible de mettre en évidence une rythmicité saisonnières comme dans les varves (cf. chapitre 2.). En effet, nous aurions compté, dans cette éventualité, 90 lamines pour 45 années de sédimentation.

La présence de phyllites orientées dans les lamines les plus grossières a permis la séparation de 252 échantillons sur la hauteur totale du prélèvement.

Pour pouvoir disposer de quantités suffisantes de matériau pour l'analyse granulométrique, nous avons prélevé un bloc de 50 cm de côté (CB1) en rive gauche du torrent de la Pisse, face à CT1.

24 analyses granulométriques ont été réalisées (tableau 3.3.).

Les courbes cumulatives ainsi que les diagrammes triangulaires (fig. 3.10.) permettent de distinguer 3 ensembles :

- l'ensemble a contient 53 à 65 % de sable, 31 à 43 % de silt, 2 à 6 % d'argile : ("sable silteux") ;
- l'ensemble b contient 8 à 36 % de sable, 56 à 91 % de silt, 1 à 8 % d'argile : ("silt argileux");
- l'ensemble c contient 2 à 10 % de sable, 74 à 82 % de silt, 1 à 8 % d'argile : ("silt argileux").

Les pourcentages d'argile (< 4 μ) sont faibles dans ces trois ensembles. Cette diversité est à mettre en relation avec la situation du prélèvement. C'est un point de rencontre de trois sources de sédiments :

- le torrent de la Pisse, dont le delta est très proche en amont, fournit l'essentiel du matériau sableux ;
- la Romanche qui charrie des dépôts plus fins ;
- le lac en lui-même où les argiles décantent.

Toutefois, chacune de ces sources de sédiments ne correspond pas respectivement aux trois ensembles granulométriques, mais explique la diversité dans la nature des matériaux. Selon le contexte saisonnier, l'un ou l'autre des apports prédomine.

Cette diversité est à l'origine de la plurimodalité et de la forme brisée des courbes.

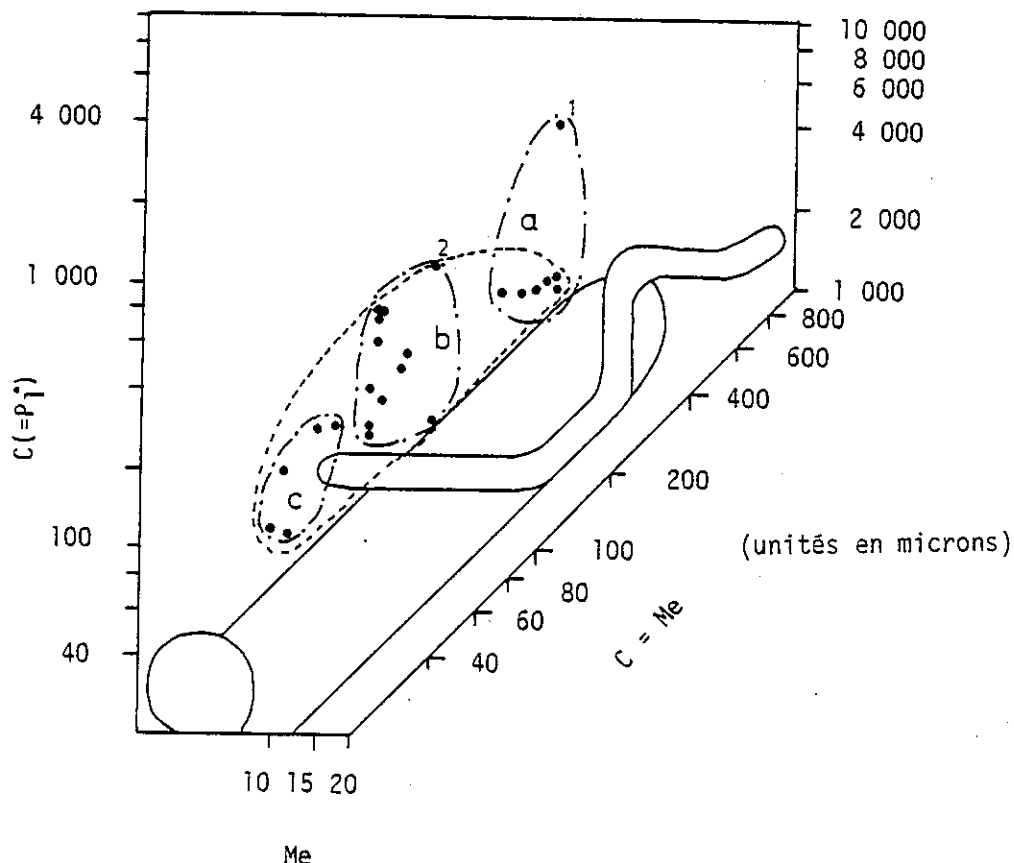


Figure 3.11 - Situation des échantillons du prélèvement CB1 dans le diagramme de PASSEGA.

Le diagramme de PASSEGA montre que l'ensemble des échantillons, hormis le 1, se situent dans une zone parallèle aux turbidites (fig. 3.11.).

3.3.2. - Le prélèvement CT7

Il est situé en rive droite de la Romanche, en bordure d'une terrasse découpée lors de la vidange de 1981 (fig. 3.8.). Le prélèvement, d'une hauteur totale d'environ 8 m, a été interrompu dans du sable au niveau du lit de la Romanche, sans que le paléosol soit atteint, après avoir traversé une succession de lamines silto-argileuses et de niveau sableux (fig. 3.12). L'alternance entre les lamines ne permet pas de mettre en évidence une rythmicité. Certaines zones sableuses montrent une stratification entrecroisée, témoin de la divagation du chenal.

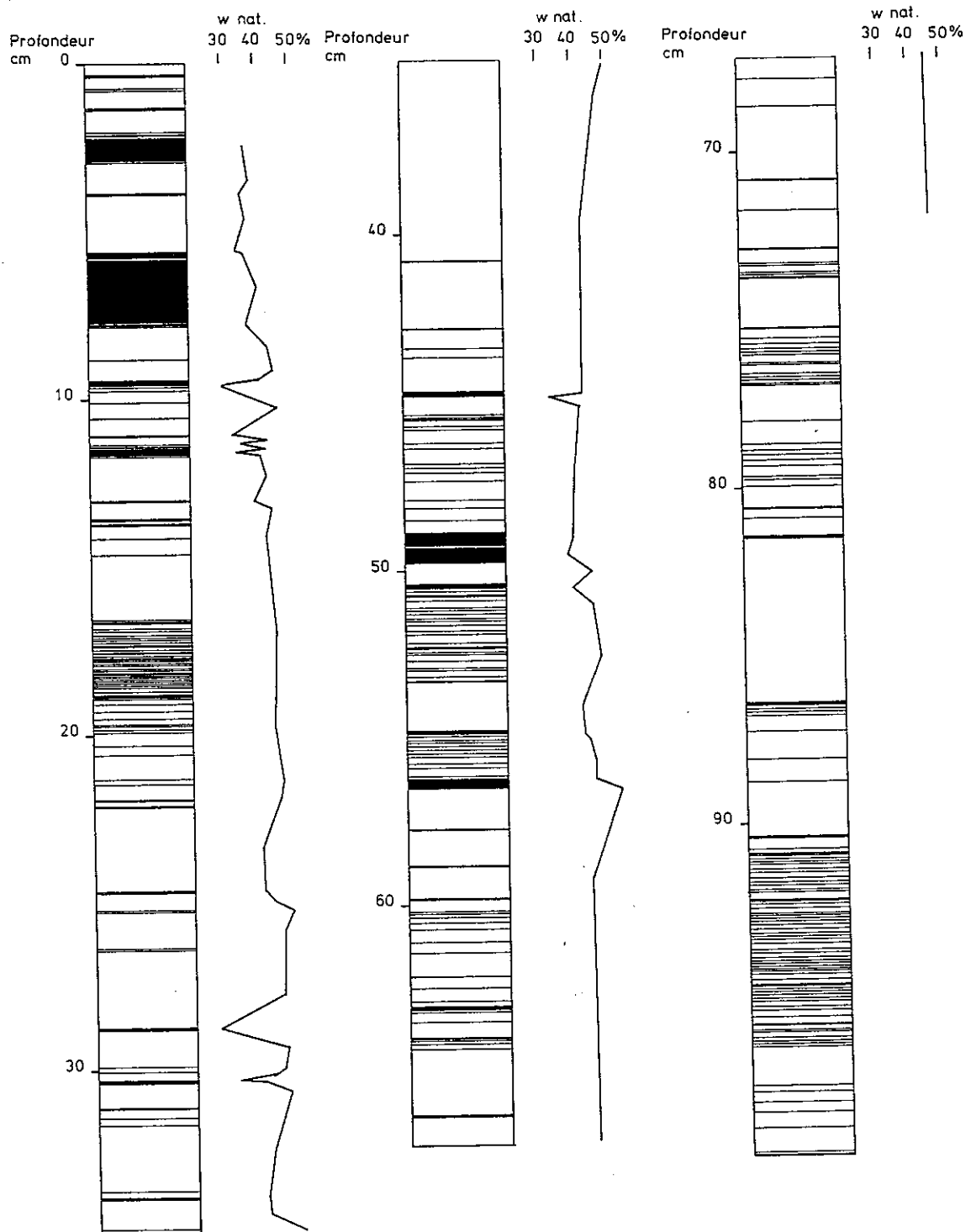
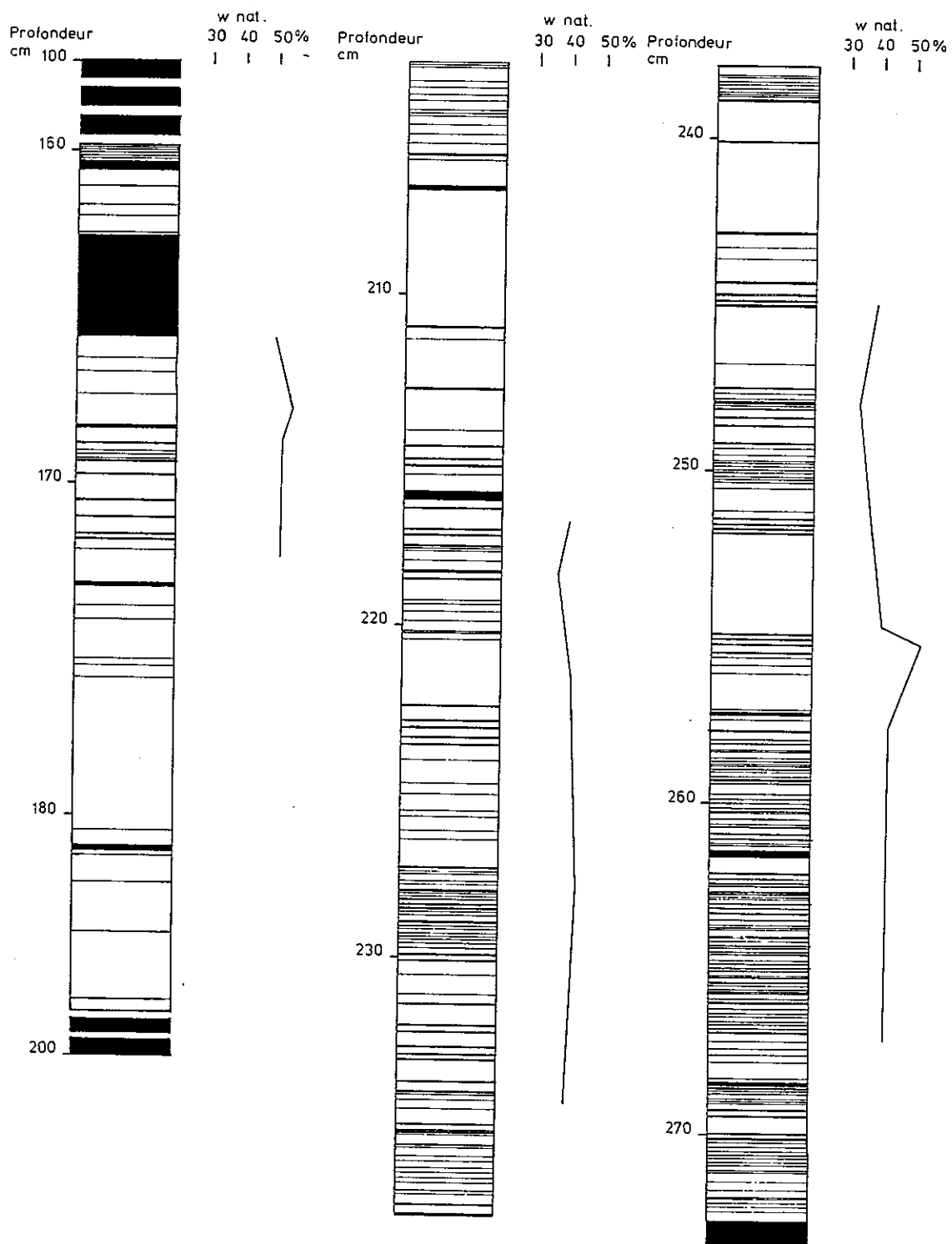
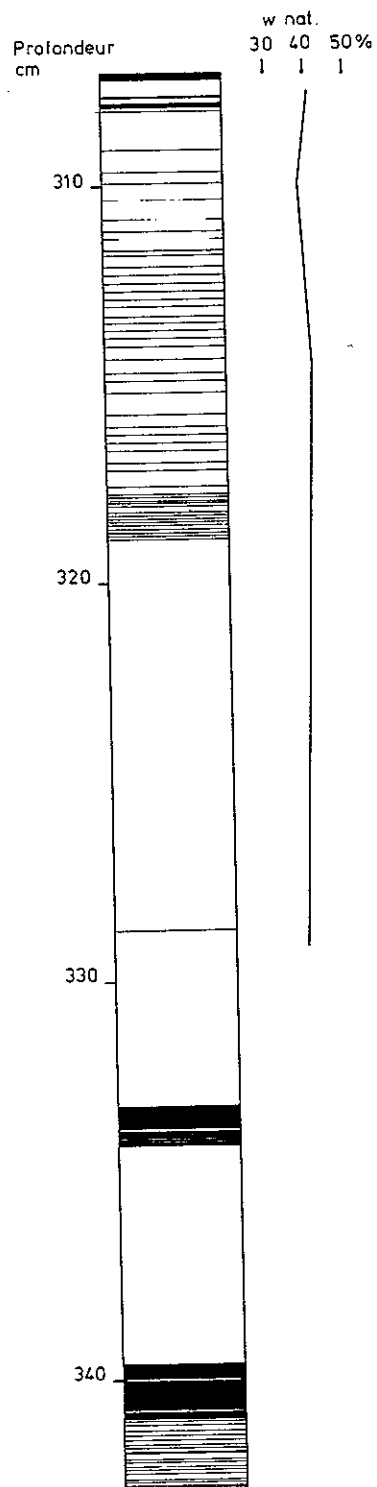
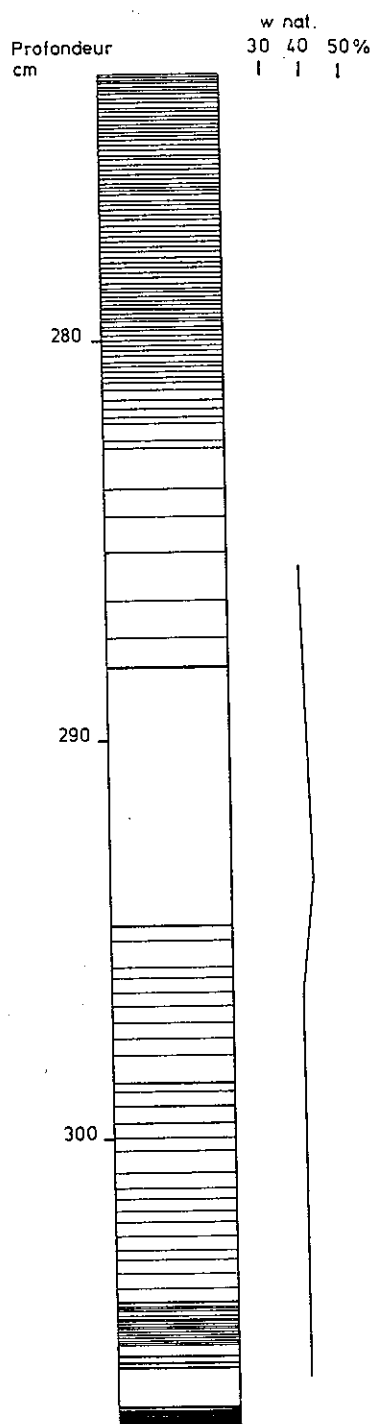
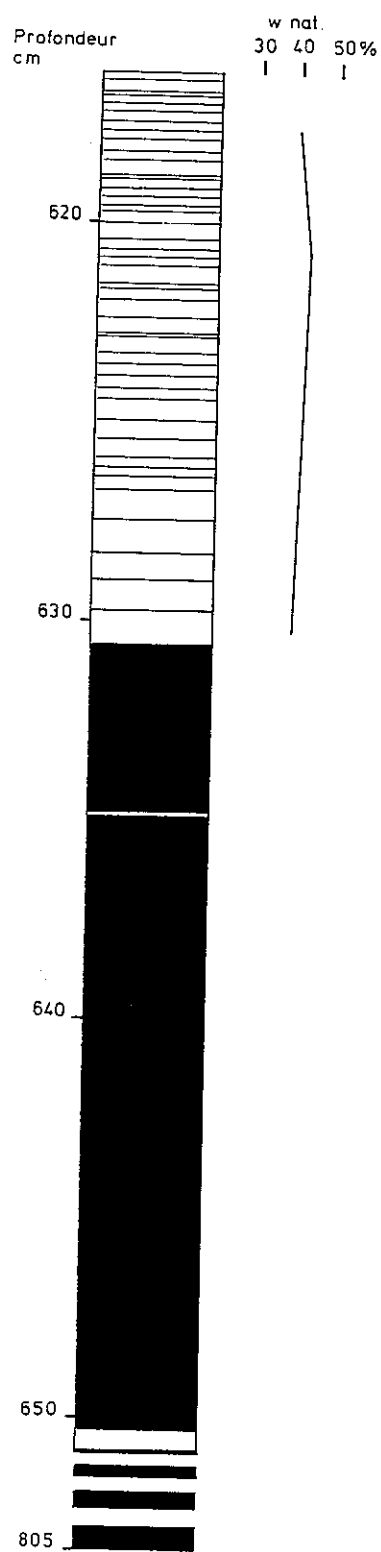
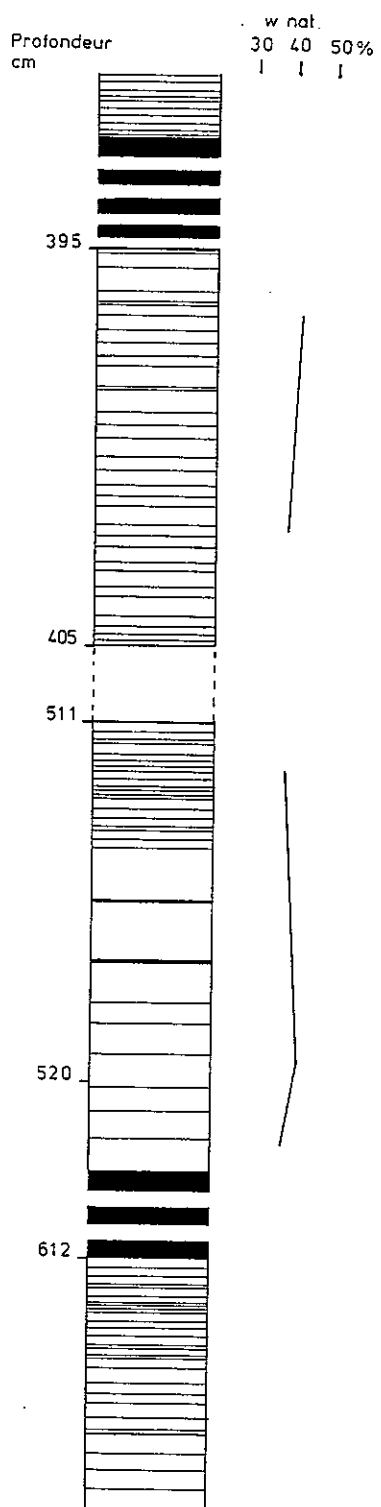


Figure 3.12. - Coupe détaillée du prélèvement CT7.







Les résultats de 63 analyses granulométriques, concernant les 60 cm supérieurs (tableau 3.4.), montrent des courbes se groupant dans un faisceau dont 7 d'entre elles s'en séparent plus ou moins (fig.3.13.). Parmi les 4 qui en sont totalement distinctes, 2 se singularisent par une teneur en sable supérieure à 50 % (cf, diagramme triangulaire, fig. 3.13). Les médianes des courbes cumulatives du faisceau sont comprises entre 5,7 et 7 phi.

Les courbes indépendantes du faisceau représentent des lamines silto-sableuses riches en phyllites.

Leur base montre toujours un contact brutal avec une très fine lamine très argileuse. Ainsi, du fait de leur faible épaisseur, il n'est pas possible de prélever une lamine grossière sans une petite quantité d'argile. Cela explique l'allure des courbes cumulatives et des histogrammes de fréquence simple tels ceux de l'échantillon CT7 - 1 - 40 (fig. 3.14).

D'autre part, les valeurs de l'aplatissement sont comprises entre -1 et 1,8 phi pour les 63 échantillons, et entre 0,38 et 1 phi pour 58 d'entre eux. 21 montrent un aplatissement négatif, 42 un aplatissement positif. Cela indique une granulométrie relativement étalée.

L'asymétrie est comprise entre - 0,25 et 0,35 phi pour la totalité des échantillons et entre - 0,1 et 0,3 pour 57 d'entre eux. 15 montrent une asymétrie négative, 48 une asymétrie positive. Cela indique que le classement est plus important du côté des éléments grossiers.

Le diagramme de PASSEGA montre qu'une partie des échantillons est groupée dans la zone des turbidites au sens strict : l'autre partie en est très proche, mais témoigne d'un dépôt par des courants de plus forte énergie (fig. 3.15). On constate aussi que 58 échantillons, sur les 63 étudiés, se regroupent dans un ensemble parallèle au segment OP du diagramme, c'est à dire à la zone des sédiments roulés avec quelques particules en suspension. Cette interprétation témoigne ainsi d'une mise en place par courants de forte énergie.

Les niveaux sableux du prélèvement CT7 (fig.3.12.) n'ont pas fait l'objet d'analyses granulométriques contrairement à ceux du prélèvement CT8.

Echantillon N°	Sable %	Silt %	Argile %	Médiane (phi)	Diamètre moyen(phi)	Asymétrie (phi)	Aplatissement (phi)	Echantillon n°	Sable %	Silt %	Argile %	Médiane (phi)	diamètre moyen(phi)	Asymétrie (phi)	Aplatissement (phi)
1	2	80	18		6,9	- 0,08	1,01	48	1,5	79,5	19	6,75	6,9	- 0,07	1,83
2	13	77	10		6	- 0,01	- 0,35	49	4	76	20	6,5	6,8	- 0,11	0,77
3	1	75	24		7,1	0,03	0,17	50	4	77	19	6,6	6,8	- 0,15	0,9
5	1,5	71,5	27,1	6,85	7,1	- 0,1	0,29	52	26,5	62	11,5	5,9	5,6	- 0,02	- 0,79
6	0	84	16		6,6	0,21	- 0,18	53	2,5	80,5	17	6,35	6,6	- 0,009	- 0,03
7	0,5	74	25,5	6,85	7,1	0,07	0,25	54	0	82	18		6,6	0,17	- 0,51
8	0	84	16		6,7	0,25	- 0,13	55	1	81	18	6,5	6,8	0,14	0,2
9	1	86	13	6,2	6,45	0,22	0,43	56	4	87	9	5,9	6,15	0,21	0,42
11	0,5	72	27,5	7	7,3	- 0,12	0,15	57	4	86,5	9,5	5,8	6,1	0,23	0,45
12	0	82	18		6,8	0,27	- 0,23	58	1	78,5	20,5	6,5	6,8	0,11	0,05
13	0,5	83	16	6,25	6,6	0,26	0,04	59	0	82,5	17,5		6,7	0,2	- 0,25
14/15	2	87,5	10,5	5,75	6,1	0,3	0,18	60-1	0,5	81	18,5	6,5	6,8	0,18	0,09
16	0,2	90	9,5	6,2	6,5	0,31	0,67	60-2	0,4	81,5	18	6,5	6,8	0,25	0,14
18	0,5	86,5	13	6,25	6,45	0,13	0,09	62	1	81	18	6,6	6,8	0,07	0,29
19	1,5	79	19,5	6,8	7	- 0,06	1,03	63	3	81	16	6,25	6,5	0,11	- 0,03
20	0	87,5	12,5	6,3	6,4	0,3	0,01	64	0,3	77,5	22	6,7	6,95	0,16	0,27
21/22	0	82	18		6,6	0,24	- 0,32	65	1	68,5	30,5	7	7,2	- 0,07	0,02
23	1	78	21	6,7	6,95	0,03	0,47	66	0,5	86,5	13	6,3	6,6	0,27	0,39
25	1,5	74	24,5		7	- 0,09	0,008	67	8	91	1	5	5,15	0,18	0,69
26/29	5,5	82,5	12	6,1	6,2	0,06	- 0,16	68	11,5	83,5	5	5,1	5,4	0,35	0,42
30	0,2	86	14	6,25	6,6	0,29	0,04	69	0,4	81,5	18	6,45	6,8	0,23	0,02
32	1	84,5	14,5	6,3	6,6	0,18	0,21	69*	1	76	23	6,75	6,9	- 0,009	- 0,09
33/34	1	80	19		6,8	0,13	0,007	70	1	91,5	7,5	6	6,2	0,33	0,81
35	1	76,5	23,5	6,8	7	- 0,02	0,55	71	0,1	80,5	19,5	6,7	6,95	0,22	- 0,14
39	0,6	88,5	11	6,25	6,5	0,27	1,05	72	0,6	74,5	25	6,85	7,1	0,02	0,34
40	51	41,5	7,5	3,4	4,85	0,28	- 0,79	73	0,7	85	14	6,2	6,55	0,25	0,08
41	1	84	15	6,4	6,6	0,12	0,39	74	0	88	12		6,5	0,32	0,15
42	0	84	15		6,7	0,21	- 0,15	75	0,7	86	13	6,2	6,55	0,19	0,16
43	0,5	74,5	25	6,9	7,2	0,05	0,11	76	0,2	87,5	12	6,1	6,4	0,33	0,29
44	0	79	21	4	6,85	0,2	- 0,35	77	0,8	77,5	21,9	6,5	6,85	0,17	- 0,26
46/47	50	43	7		4,55	0,15	- 0,96	78	0,1	86	14	6,05	6,4	0,27	- 0,31

Tableau 3.4. - Paramètres granulométriques du prélèvement CT7 - 1

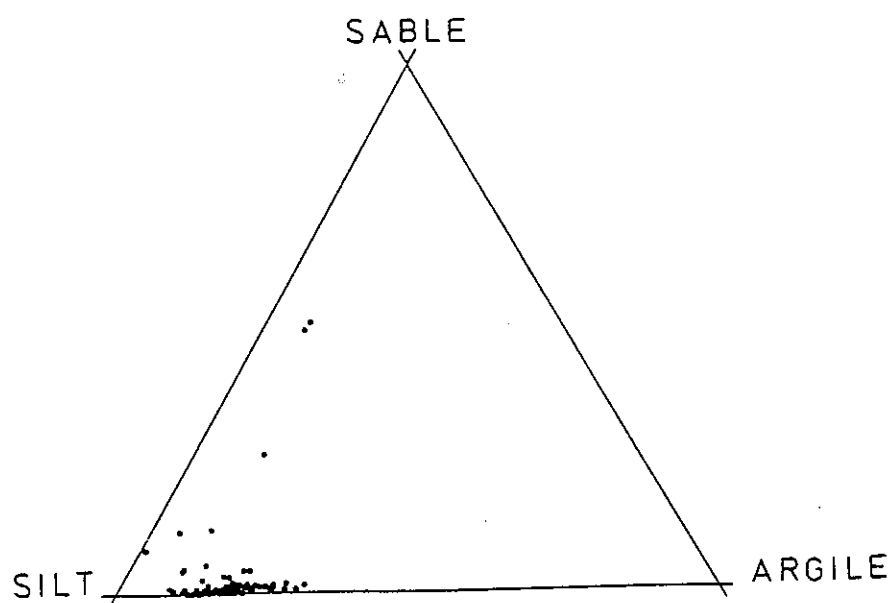
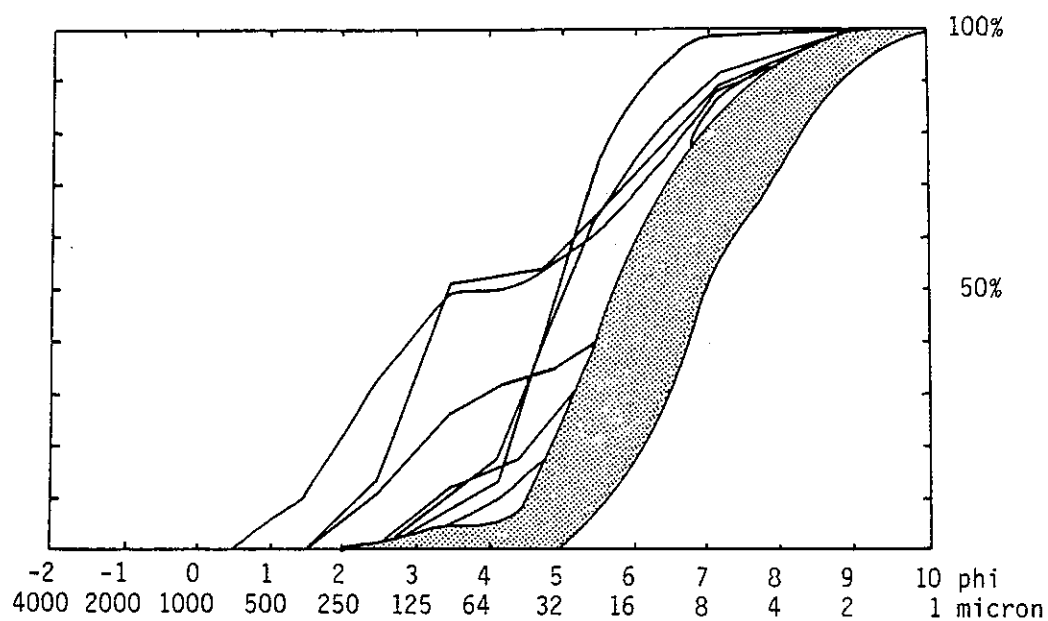


Figure 3.13. - Granulométrie du prélèvement CT7: courbes cumulatives en ordonnée arithmétique et diagramme triangulaire (argile, silt, sable).

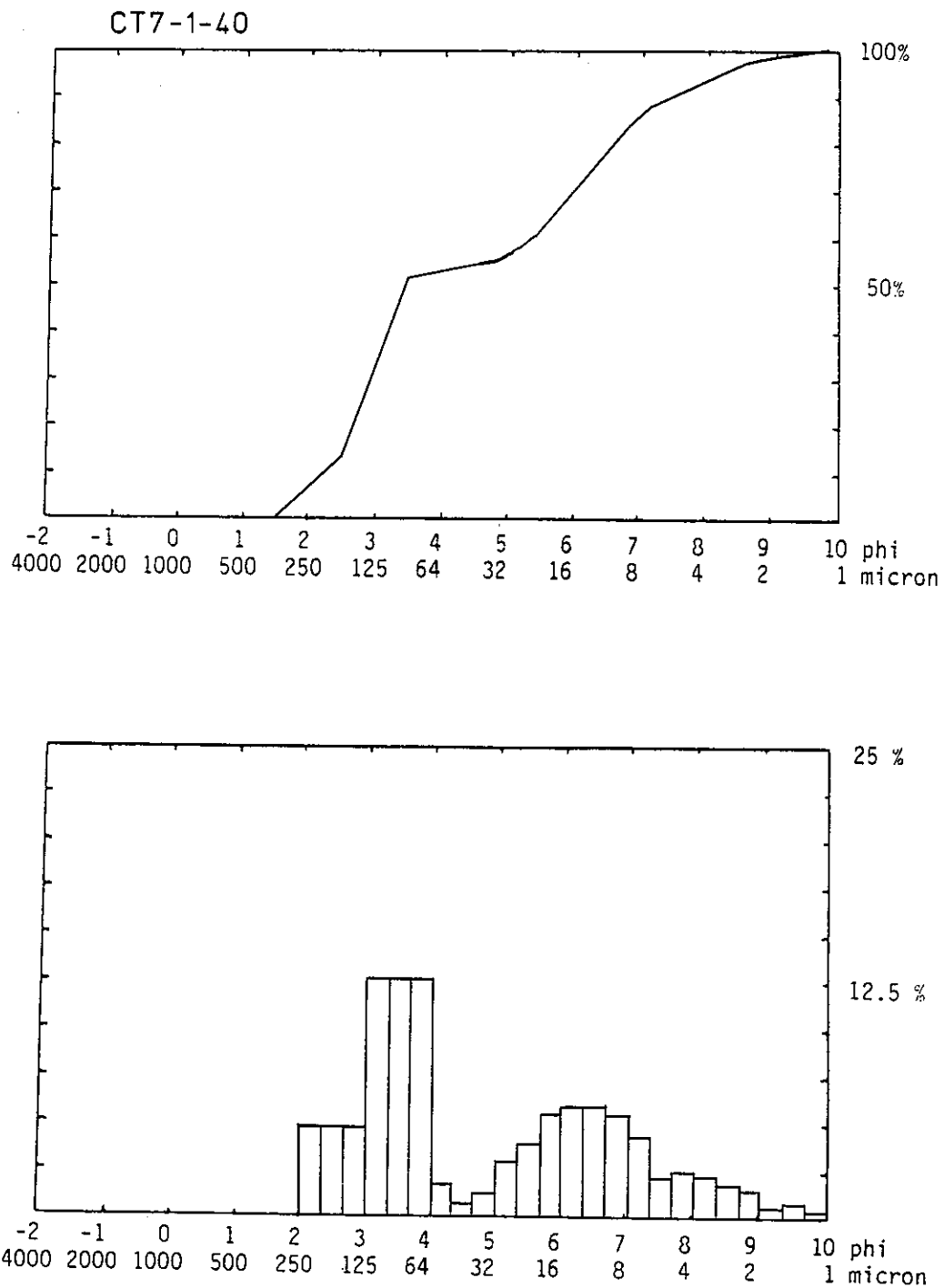


Figure 3.14. : Granulométrie de l'échantillon CT7-1-40 : courbe cumulative en ordonnée arithmétique et histogramme de fréquence simple.

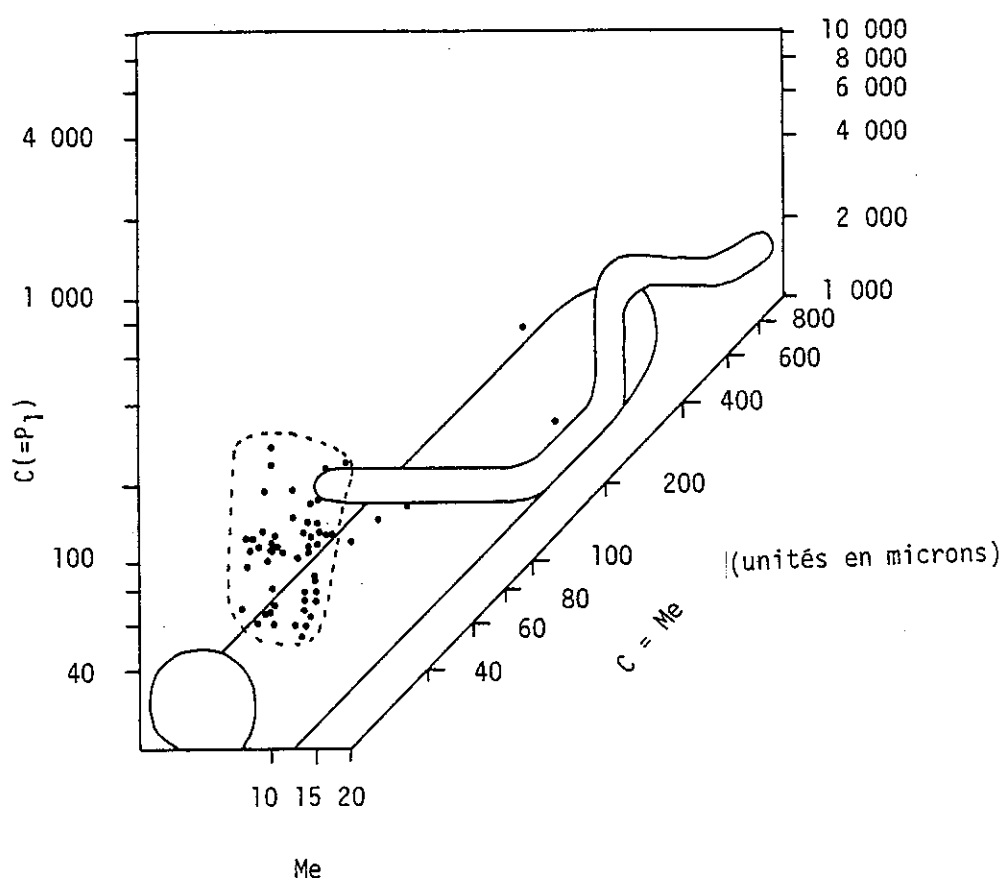


Figure 3.15. : Situation des échantillons du prélèvement CT7 dans le diagramme de PASSEGA.

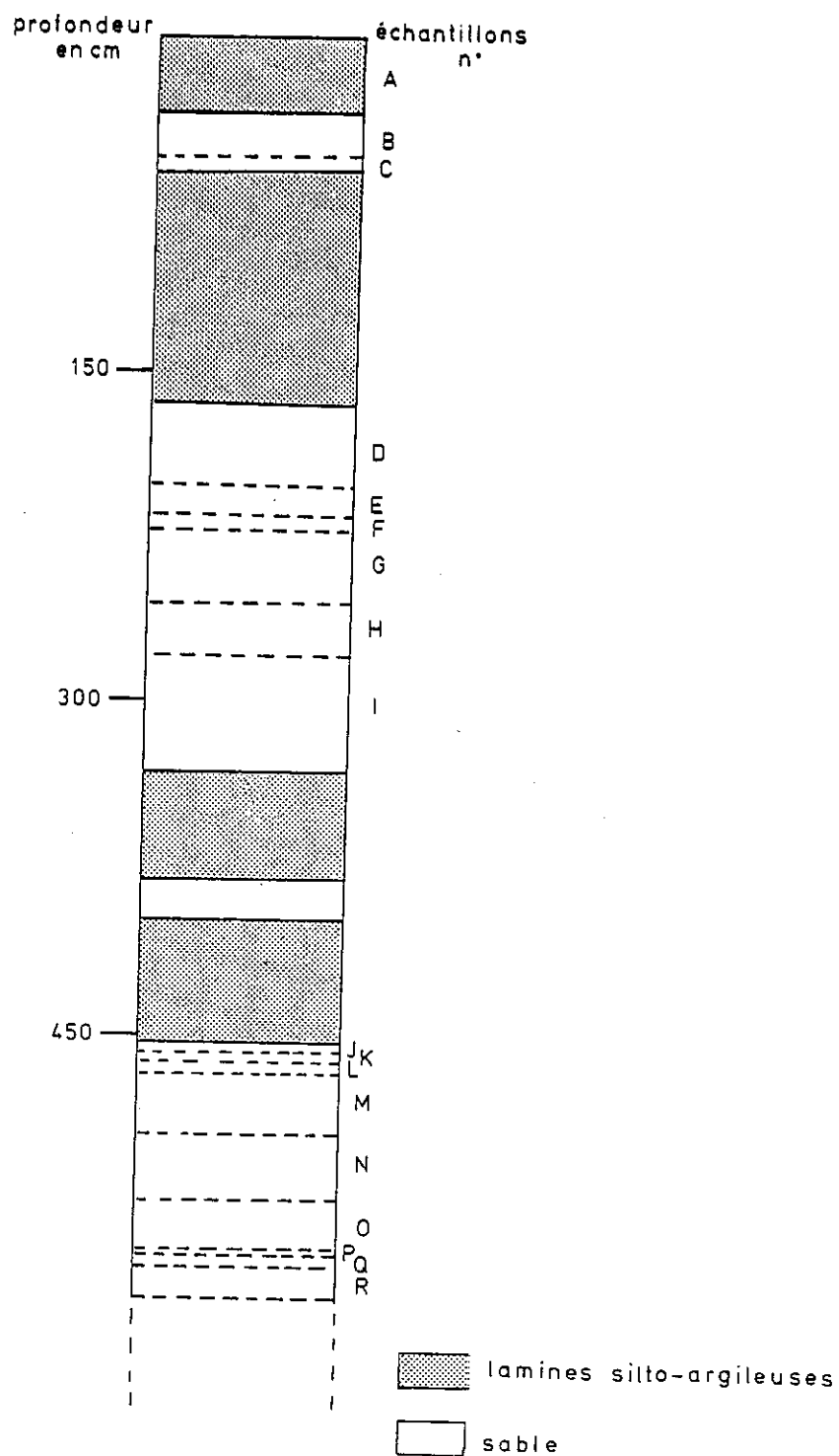


Figure 3.16. : Coupe du prélèvement CT8.

3.3.3. - Le prélèvement CT8

Ce prélèvement, situé en bordure de terrasse en rive gauche de la Romanche (fig.3.8.), a été interrompu à environ 6 m de profondeur, sans que le substratum soit atteint. Les niveaux sableux sont dominants (fig. 3.16), Sauf pour l'échantillon A, toutes les analyses granulométriques concernent des niveaux sableux. Leur profondeur par rapport à la surface est indiquée dans le tableau 3.5, ainsi que les paramètres granulométriques (en ϕ).

Les paramètres Sk_1 et σ_1 ne peuvent pas être calculés pour H et C en l'absence de l'extrémité de la courbe. Les valeurs de l'asymétrie (Sk_1) ne sont pas élevées. On constate que les deux échantillons dont la médiane est la plus élevée (K et N) ont l'asymétrie la plus fortement négative, c'est à dire vers les éléments fins.

Selon la classification de FOLK et WARD, l'échantillon E est assez bien classé ; les échantillons A, B, F, J, K, N, sont moyennement classés ; D, I, L, M, R faiblement classés ; O, P, Q mal classés et G très mal classé. D'une manière générale, ces courbes montrent une granulométrie étalée, signifiant une immaturité du matériau (fig. 3.17.)

Le diagramme de PASSEGA montre que le transport se fait avec une énergie caractéristique des suspensions granoclassées avec quelques éléments roulés et saltation ; ce qui nécessite un courant important (fig. 3.18)

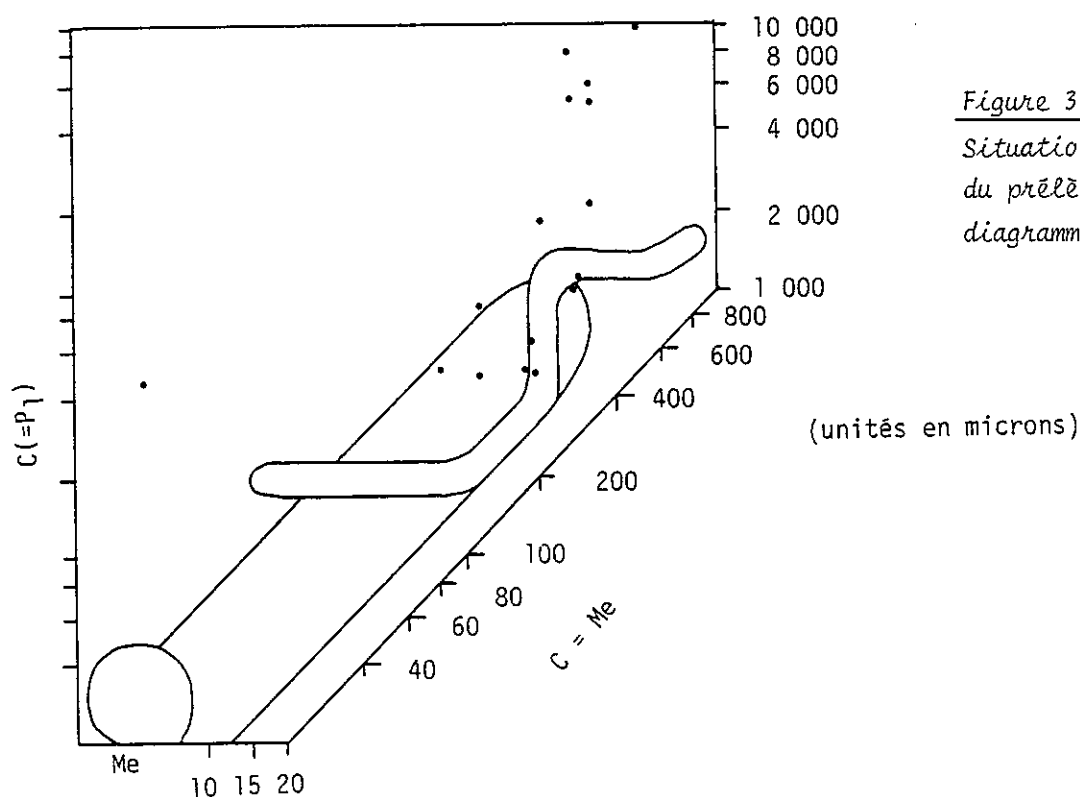


Figure 3.18. :
Situation des échantillons
du prélèvement CT8 dans le
diagramme de PASSEGA.

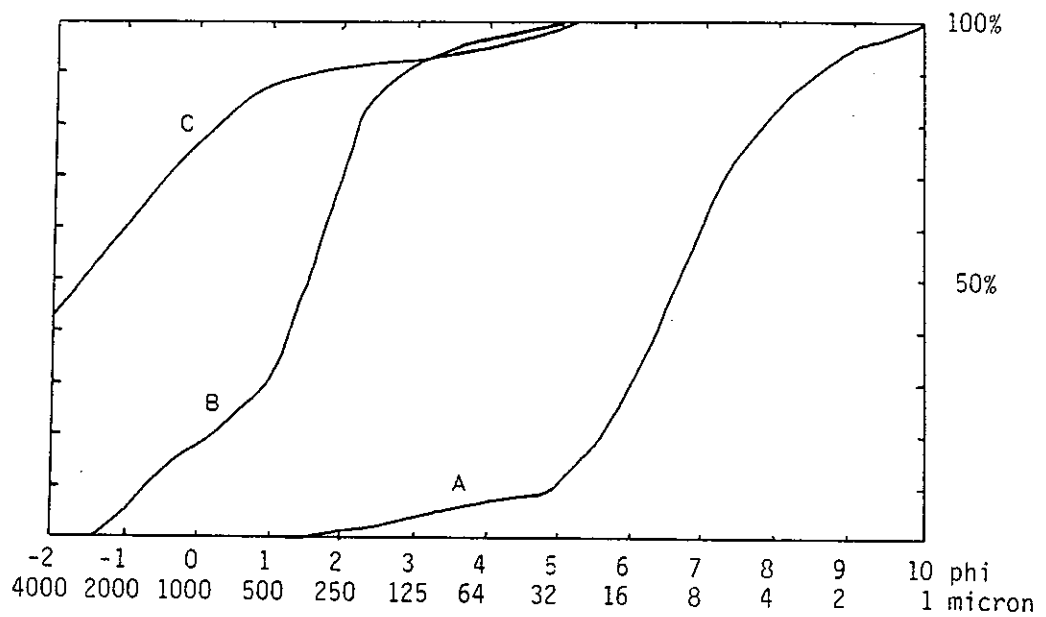


Figure 3.17.1. : Courbes cumulatives en ordonnée arithmétique des échantillons A, B et C du prélèvement CT8.

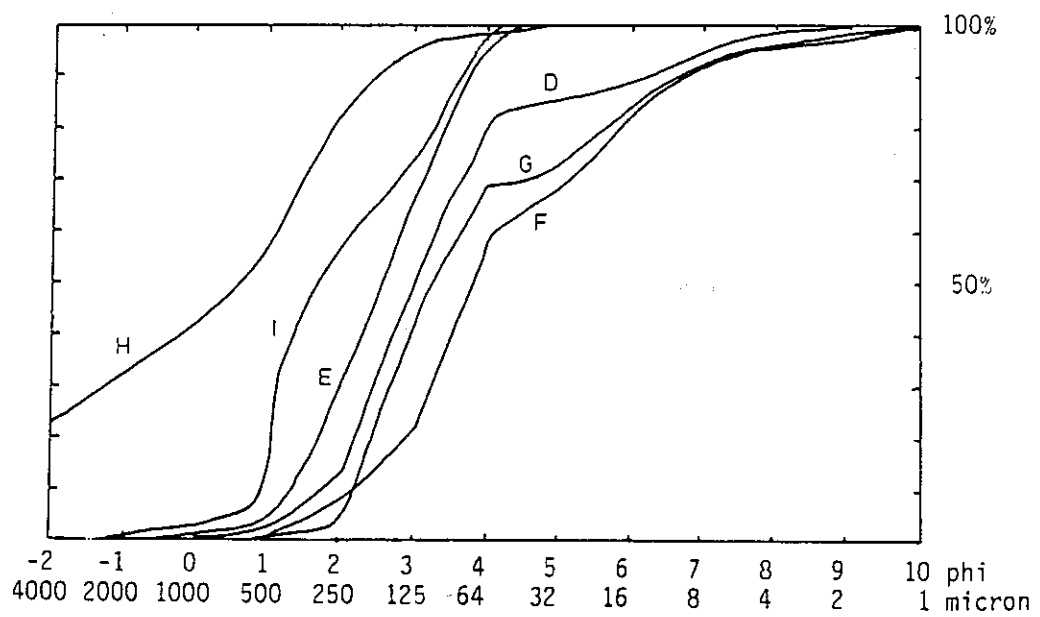


Figure 3.17.2. : Courbes cumulatives en ordonnée arithmétique des échantillons D à I du prélèvement CT8.

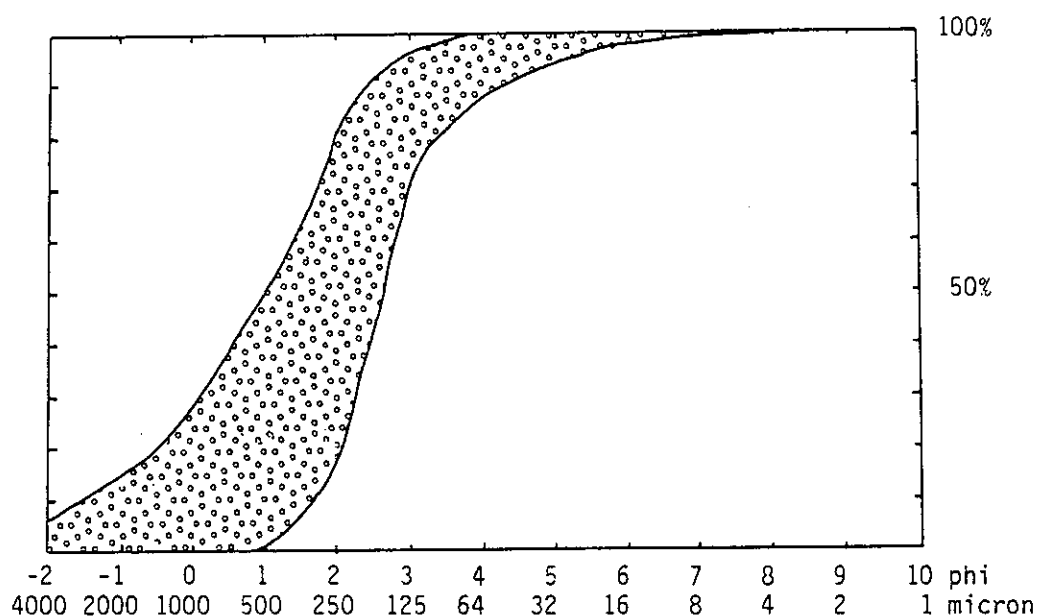


Figure 3.17.3. : Fuseau des courbes cumulatives en ordonnée arithmétique des échantillons J   R du prélèvement CT8.

N� d'�chantillon	Profond. (cm)	Epaisseur (cm)	Me	Mz	Sk ₁	� ₁
CT8-A	0	35	5,25	6,2	0,8	1,4
CT8-B	35	20	2,4	2,5	0,1	1,2
CT8-C	55	10	- 1,7	- 1,6		
CT8-D	165	40	3,0	3,4	0,5	1,7
CT8-E	205	15	2,45	2,5	0,25	0,7
CT8-F	220	8	3,85	4,0	0,13	1,4
CT8-G	228	27	3,25	3,6	0,4	3,1
CT8-H	255	25	0,7	0,2		
CT8-I	280	55	1,8	2,0	0,4	1,6
CT8-J	455	3	1,9	1,8	- 0,1	1,2
CT8-K	458	2	1,65	1,6	- 0,18	1,2
CT8-L	460	5	2,35	2,3	- 0,09	1,8
CT8-M	465	28	1,75	1,7	- 0,07	1,5
CT8-N	493	30	1,05	0,8	- 0,16	1,3
CT8-O	523	23	1,9	2,0	0,05	2,4
CT8-P	546	2	2,75	2,8	0,17	2,4
CT8-Q	548	4	2,35	2,5	0,37	2,2
CT8-R	552	12	1,8	1,9	0,2	1,6

Tableau 3.5. - Paramètres granulométriques des sables du prélèvement CT8.

3.3.4. - Les dépôts intervidanges

Les vidanges successives de la retenue du Chambon au cours des années 1980, 1981 et 1982, ont permis de prélever des sédiments dont la période de dépôt est connue avec certitude.

3.3.4.1. - Dépôt entre les vidanges de 1980 et 1981 (C23)

Le prélèvement C23 représente la sédimentation de mai 1980 à janvier 1981, correspondant à la période d'immersion entre les deux vidanges. Il est situé au pied du delta du torrent de la Pisse (fig. 3.8). Il recouvre un niveau de fentes de dessiccation datant de la vidange du printemps 1980. Celles-ci sont décrites dans le paragraphe "figures sédimentaires" (cf. 3.1.4.1.).

Ce prélèvement est significatif de la grande variation du rythme du dépôt dans le temps. Chaque lamine correspond à un épisode individuel de sédimentation. 17 échantillons ont pu être séparés grâce à la présence d'autant de lits silteux permettant leur décollement. A l'intérieur de chacun d'eux des lamines ont pu être comptées, sans que l'on puisse les séparer. On aboutit à un total de 54 lamines sur 6,8 cm, ce qui correspond à une moyenne de 1,25 mm par lamine (fig. 3.19.1.).

Le matériau est à dominante silteuse. Les courbes granulométriques et le diagramme triangulaire montrent son homogénéité (fig. 3.20). Seules 3 courbes (et 3 points sur le diagramme triangulaire) se dégagent. Elles correspondent aux 3 échantillons dont le diamètre moyen est le plus élevé.

L'homogénéité apparente des lamines n'est pas confirmée lorsqu'on étudie en détail la variation des paramètres tels que l'asymétrie et l'aplatissement (tableau 3.6. et fig. 3.19.2.). L'asymétrie varie de 0,29 à - 0,24 et l'aplatissement de 1,35 à 0,66.

L'échantillon de la base du prélèvement est le plus grossier. Il correspond à la vidange de 1980. Il résulte des ruissellements sur les terrasses. Il montre l'aplatissement le plus négatif.

Si on compare le diagramme de PASSEGA du prélèvement C23 (fig. 3.21.) à celui du prélèvement CT7 (fig. 3.15.), on constate que le C23 correspond à un dépôt par des courants de plus forte énergie, dus vraisemblablement à l'influence du torrent de la Pisse.

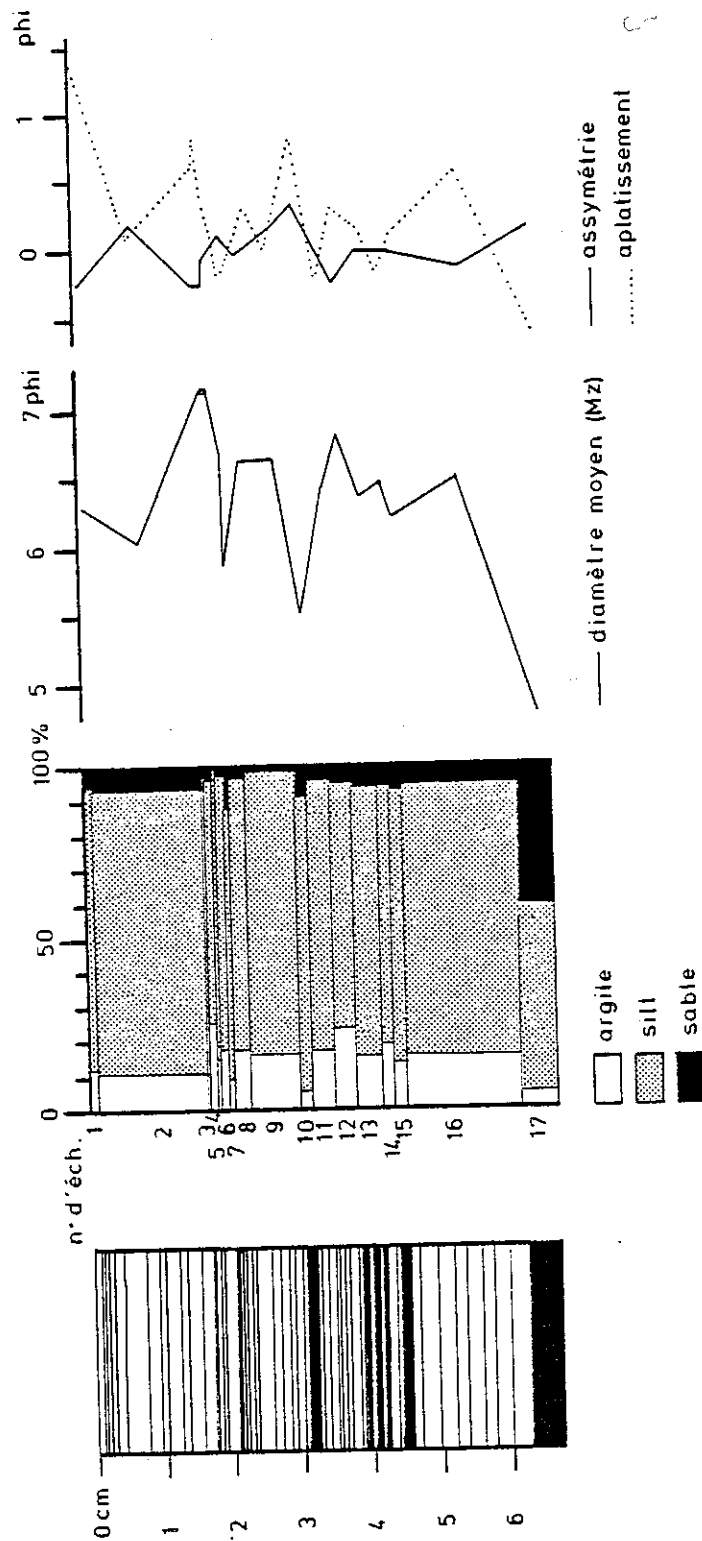


Figure 3.19 : Coupe détaillée (1) et paramètres granulométriques (2) du prélèvement C23.

Echan- tillon-N°	Sable %	Silt %	Argile %	Médiane phi	Diamètre moyen-phi	Asymétrie phi	Aplatiss- ement-phi.
1	6	82,5	11,5	6,35	6,3	- 0,24	1,35
2	6,5	82,5	11	5,8	6,0	0,2	0,09
3	2,5	69,5	28	7,2	7,1	- 0,23	0,59
4	3,5	71	25,5	7,1	7,1	- 0,22	0,81
5	4,5	81	14,5	6,5	6,5	- 0,05	0,43
6	3	80	17	6,55	6,65	0,02	0,16
7	12	78,5	9,5	5,8	5,9	0,1	- 0,16
8	3,5	79	17,5	6,55	6,6	0,02	0,23
9	1	83	16	6,45	6,6	0,14	0,03
10	9	86	5	5,3	5,5	0,29	0,83
11	4	79	17	6,3	6,4	0,1	- 0,21
12	4	72,5	23,5	6,85	6,8	- 0,2	0,25
13	6	79	15	6,2	6,35	- 0,01	0,17
14	6,5	76	17,5	6,4	6,45	- 0,02	- 0,14
15	7,5	79,5	13	6,25	6,2	- 0,03	0,12
16	5,5	79,5	15	6,5	6,5	- 0,11	0,56
17	40,5	55	4,5	5	4,8	0,14	- 0,66

Tableau 3.6.- Paramètres granulométriques du prélèvement C23.

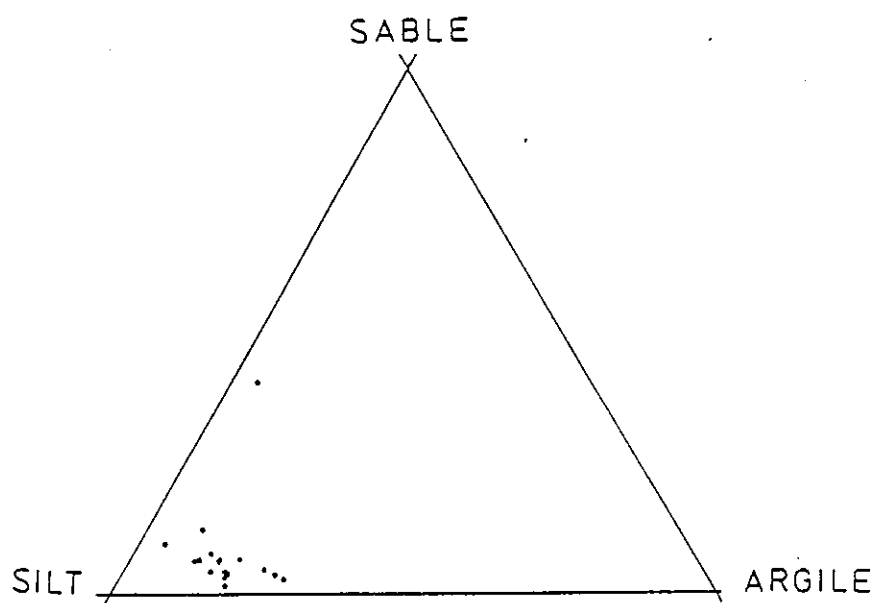
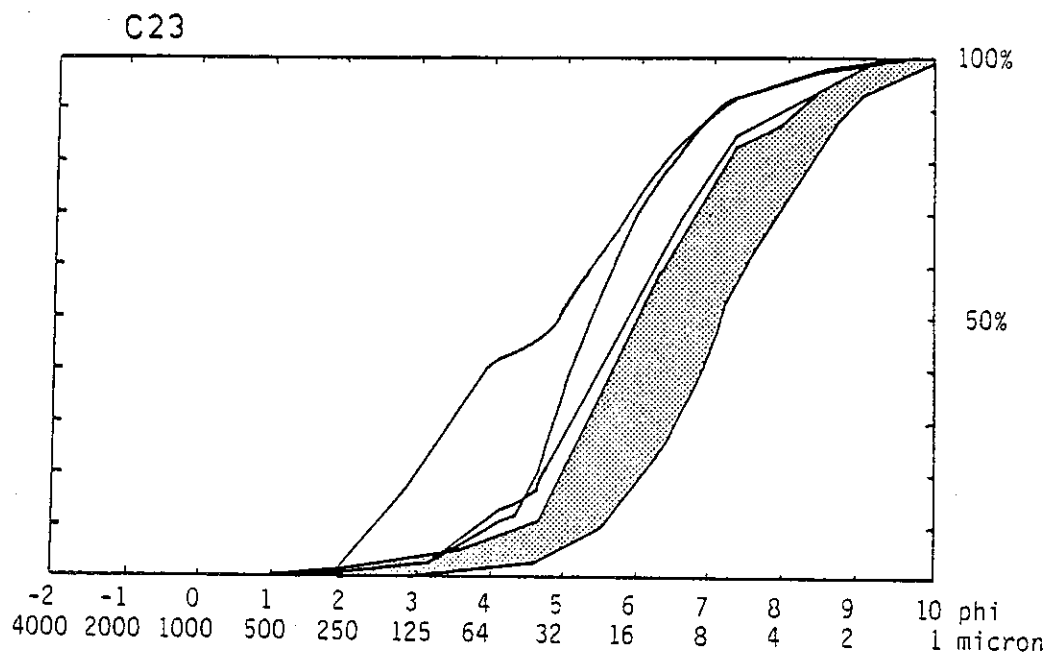


Figure 3.20. - Granulométrie du prélèvement C23 : courbes cumulatives en ordonnée de probabilité et diagramme triangulaire (argile - silt - sable).

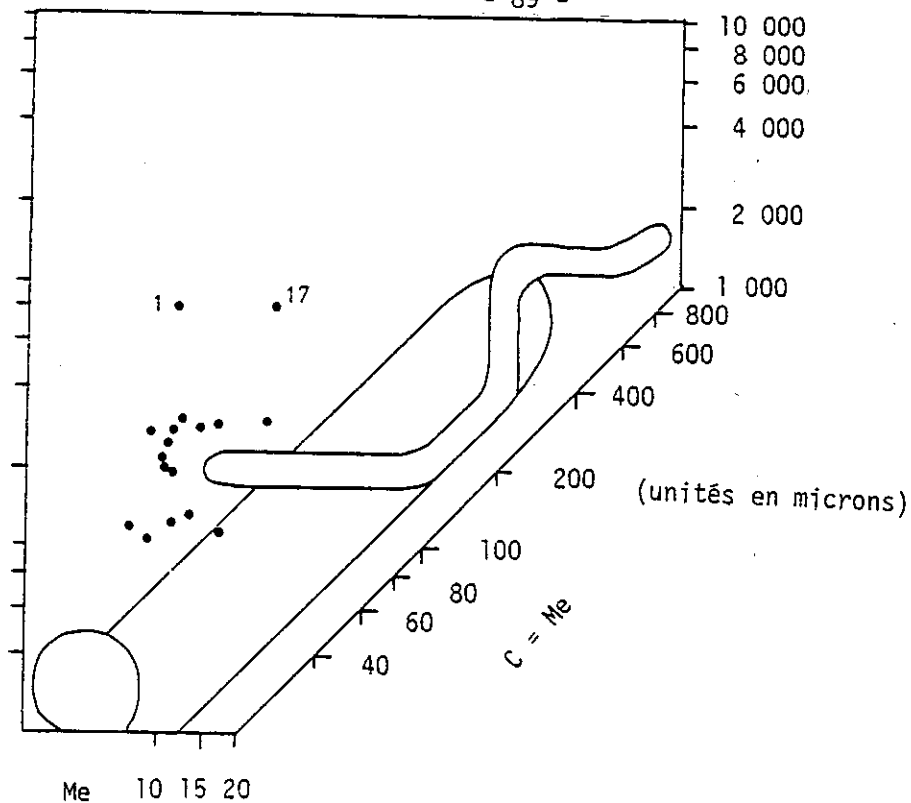


Figure 3.21. - Situation des échantillons du prélèvement C23 dans le diagramme de PASSEGA.

On peut comparer cette description à celle du prélèvement C17 (fig. 3.22), en rive droite de la Romanche, en amont de la prise du Ferrand (fig. 3.8). Il peut de la même façon être daté par les fentes de dessiccation sous-jacentes comme étant contemporain du prélèvement C 23. En ce point, 3,9 cm se sont déposés de mai 1980 à janvier 1981. Cette différence d'épaisseur du dépôt en rive droite et en rive gauche sera confirmée par l'étude de l'alluvionnement par échosondage (cf. 5.1.).

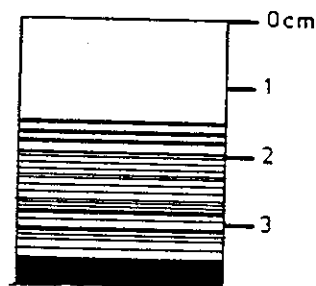


Figure 3.22. - Coupe détaillée du prélèvement C17.

Une étude palynologique est en cours. Elle devrait permettre de préciser la date de dépôt de chaque lamine. Il sera ainsi possible de vérifier à l'aide des courbes de débit de la Romanche et de pluviométrie à la Grave si, comme nous le pensons, chaque lamine correspond à un épisode climatique particulier.

3.3.4.2. - Le dépôt entre les vidanges de 1981 et 1982 (C26)

En 1982 une nouvelle vidange du Chambon a permis le prélèvement d'un échantillon correspondant au dépôt entre les vidanges de 1981 et de 1982. Au cours de la vidange de 1981, des repères ont été placés dans le fond de la retenue, dans le but de situer les prélèvements sur la restitution photogrammétrique faisant suite à la mission de photographie aérienne de mai 1981. L'un de ces repères était constitué d'une plaque marquée d'une croix, fixée sur un support de 25 cm de haut,

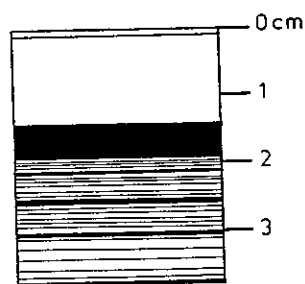


Figure 3.23. - Coupe détaillée du prélèvement C26.

Le matériau prélevé sur cette plaque (C 26) correspond donc avec certitude au dépôt entre les vidanges de 1981 et 1982.

La partie supérieure du prélèvement montre un lit de 13 mm d'épaisseur. Des lamines parallèles et horizontales, alternativement silto-argileuses et silto-sableuses lui succèdent (fig. 3.23.).

La hauteur totale (3,8 cm) est inférieure à celle des prélèvements correspondant au dépôt entre les vidanges de 1980 et 1981 (fig. 3.19.1. et 3.22.). La comparaison entre les hauteurs doit tenir compte de la localisation des prélèvements (fig. 3.8.). Le plus récent (1981-82) provient de la terrasse la plus haute, en aval du delta du torrent de la Pisse. Le plus ancien (1980-81) provient de la terrasse la plus basse en aval de ce même delta, plus près du centre du lac. Plus on se rapproche du centre du lac, plus les dépôts sont importants.

D'autre part, en régime nivoglaciaire, le taux de sédimentation peut

varier sensiblement d'une année à l'autre. La hauteur du prélèvement C 26 est voisine de la moyenne annuelle de la sédimentation depuis la première mise en eau au niveau du prélèvement CT1 (rive droite du torrent de la Pisse) : environ 4,5 cm.

Il faut retenir de l'étude des dépôts intervidanges que le taux de sédimentation peut varier sensiblement sur l'étendue de la retenue.

D'autre part, le nombre élevé de lamines par année et donc l'absence d'un rythme simplement binaire souligne le fait que le terme "varve" ne peut s'appliquer ici. Par contre, le terme de "faciès à lamines" ainsi que nous l'avons défini (cf. 2.5), convient parfaitement. En effet, pour une année de sédimentation plus de 2 lamines peuvent être comptées : 54 lamines pour l'échantillon C23, 42 pour le C17, 47 pour le C26.

3.3.5. - Le prélèvement C21 : une "turbidite" -

Le prélèvement C 21 est situé en rive gauche de la Romanche, en rive droite du torrent de la Pisse, en aval du delta de progradation (fig. 3.8.).

Le torrent ayant dégagé une coupe fraîche, la description suivante peut être faite (fig. 3.24.). Les numéros entre parenthèses sont ceux des courbes granulométriques ; les lettres sont celles de la terminologie de BOUMA.

De bas en haut on observe :

- des argiles litées (1) ;
- des galets et graviers à matrice argileuse, sur 31 cm. Ils ravinent la couche précédente, montrant que les argiles ont été érodées (2 et 3);
- du sable en lamines parallèles passant rapidement à un sable à rides entrecroisées (4), sur 8 cm;
- du sable plus grossier que dans le niveau précédent montrant des rides entrecroisées (5), sur 5 cm ;
- deux couches de sable très fin à lamines parallèles sur 27 cm (6 et 7);
- des argiles litées (8), sur 2 cm.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION

B.P. 53

F. 38041 GRENOBLE CEDEX

Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58

Mail : ptalour@ujf-grenoble.fr

27 AOUT 2003

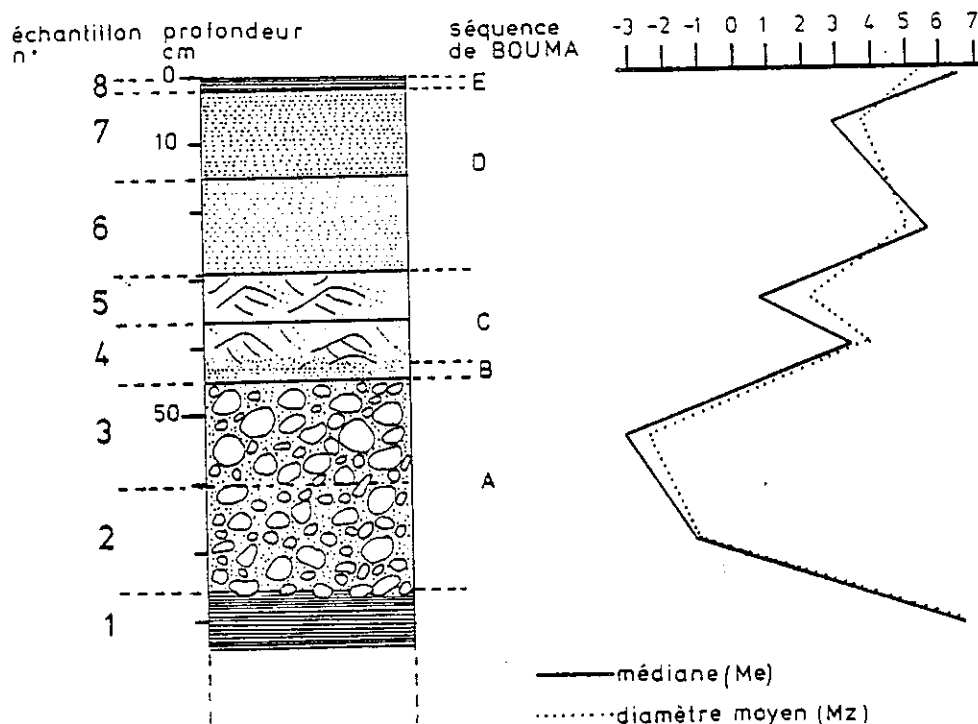


Figure 3.24. : Coupe détaillée et paramètres granulométriques du prélèvement C21 (une "turbidite").

Numéro d'échantillon	Médiane (Me)	Diamètre (Mz)	Déviatión standard σ_1	Asymétrie (Sk ₁)
8	6,3	5,5	1,1	- 0,15
7	2,9	3,8	2,5	0,67
6	5,3	5,0	2,1	- 0,17
5	0,8	2,2	2,5	0,76
4	3,2	3,8	2,4	0,34
3	- 3,4	- 2,6	2,3	0,59
2	- 1,2	- 1,15	2,5	0,3
1	6,3	6,4	1,1	0,02

Tableau 3.7. - Paramètres granulométriques des échantillons du prélèvement C 21 (en phi).

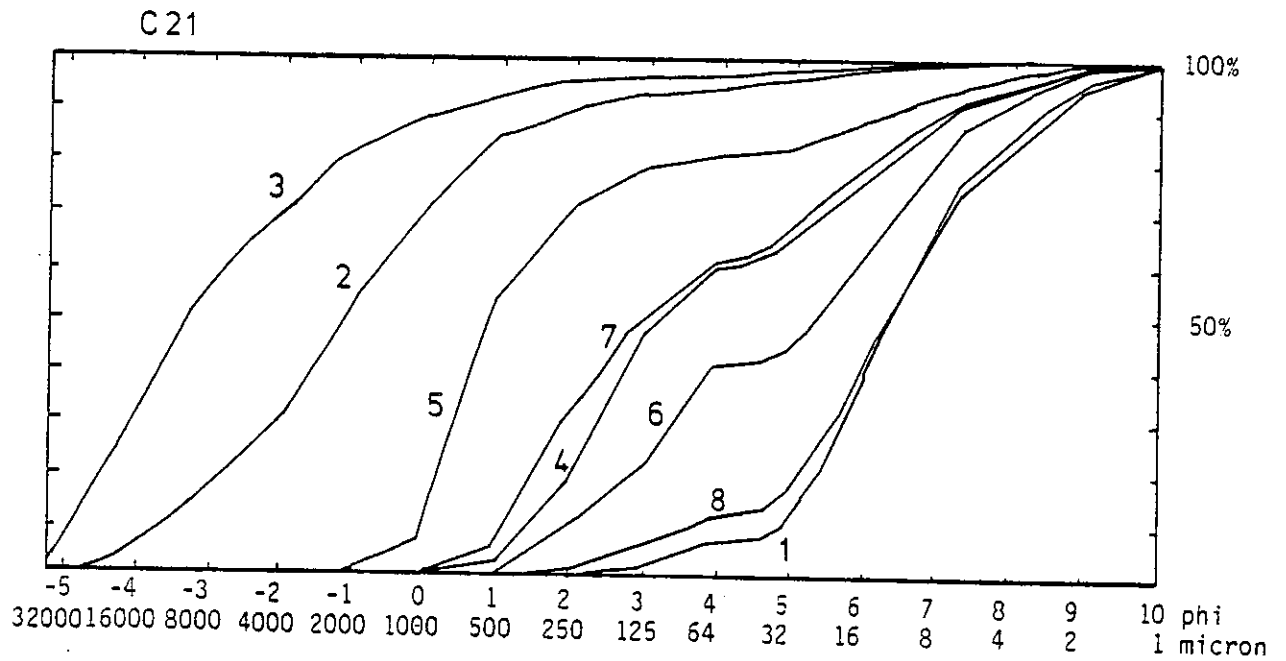


Figure 3.25. : Courbes granulométriques cumulatives en ordonnée arithmétique du prélèvement C21

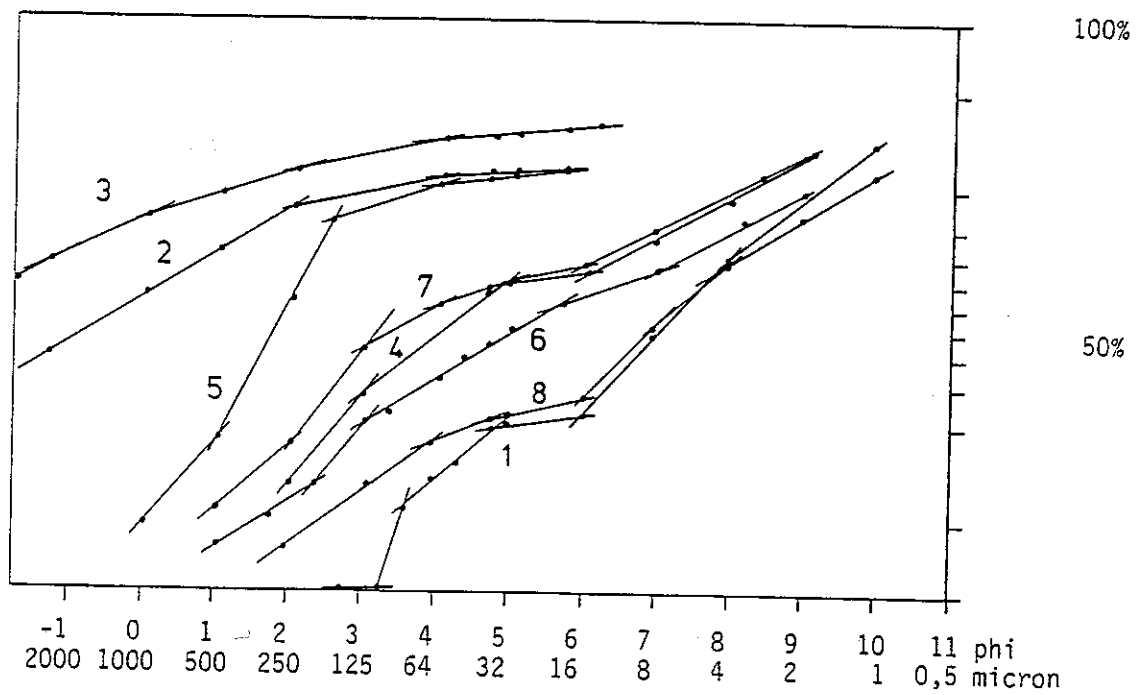


Figure 3.26. : Courbes granulométriques cumulatives en ordonnée de probabilité du prélèvement C21.

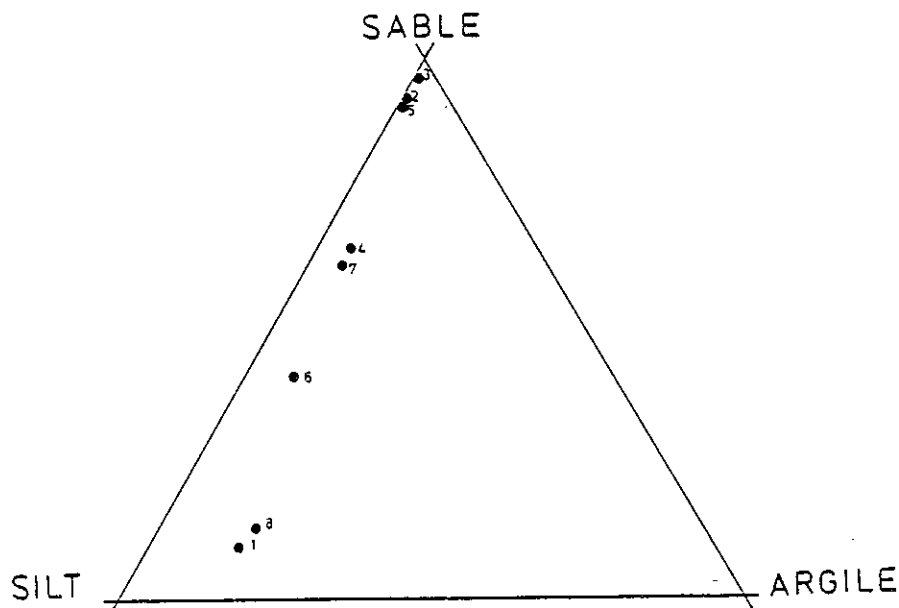


Figure 3.27. : Diagramme triangulaire (argile-silt-sable) du prélèvement C21.

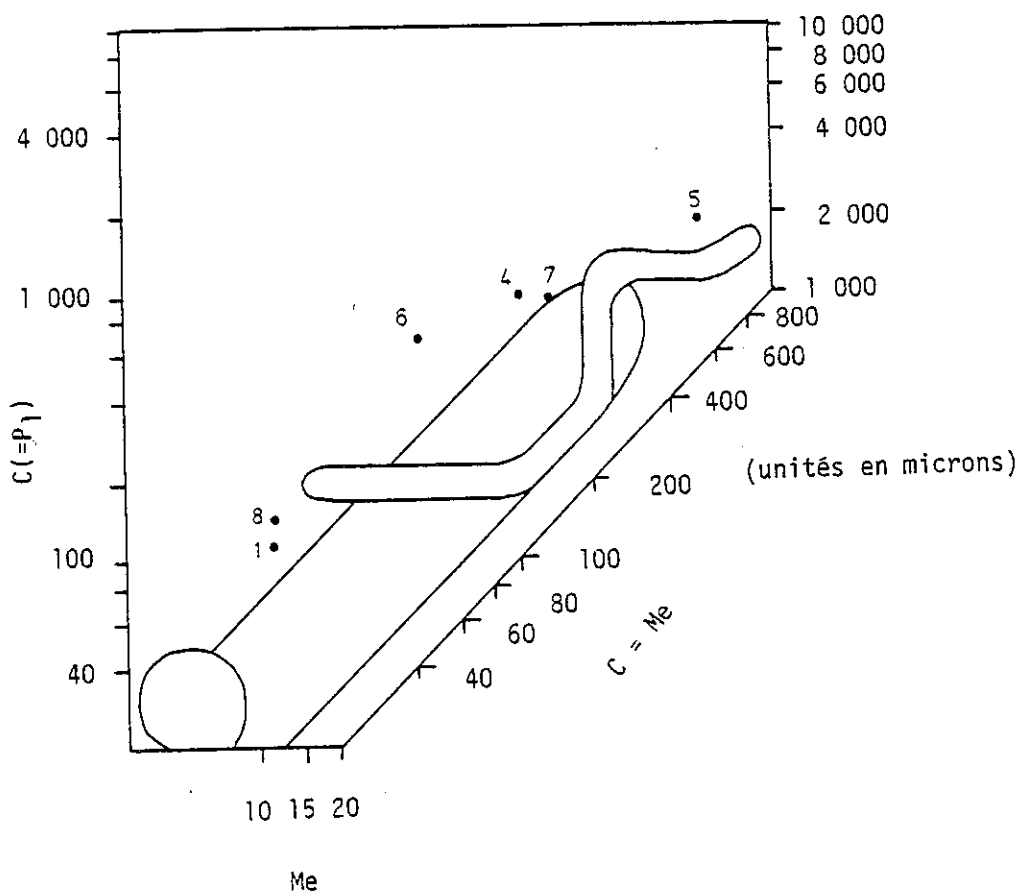


Figure 3.28. : Situation des échantillons du prélèvement C21 dans le diagramme de PASSEGA.

Le contact entre chacun des termes de cette coupe est brutal, sauf en ce qui concerne les galets et graviers à matrice argileuse (2 et 3) qui ont artificiellement été séparés en deux couches.

Cette description est proche de celle faite par BOUMA (1962) lorsqu'il définit un modèle de faciès turbiditique, appelé depuis séquence de BOUMA.

Chacun des termes de cette séquence se retrouve dans la description précédente.

Toutefois, si l'on observe les courbes granulométriques respectives des ensembles (2, 3), (4, 5), (6, 7), on remarque que le classement est inverse de ce qui est généralement admis (fig. 3.25 et 3.26.). Chacun des ensembles ne doit donc pas être pris comme une entité, mais comme la superposition de deux niveaux correspondant chacun à deux épisodes distincts de la sédimentation.

Si l'on se réfère à la terminologie de BOUMA, le prélèvement C 21 correspond à une "turbidite". C'est le dépôt sédimentaire résultant d'un "courant de turbidité". Ce terme signifie (selon BOUMA) un courant de forte énergie suivant une pente sous-lacustre (ou sous-marine).

Lorsqu'une eau très chargée entre en contact avec une eau claire, un courant va se créer du fait des différences de densité. L'eau chargée va circuler sur le fond. Le contraste peut être accentué par des différences de densité des eaux dans les lacs à stratification thermique saisonnière (cf. 2.4.1.1.).

Ces phénomènes ont été aussi bien décrits pour la marge continentale que pour les lacs. A ce titre, l'étude des lacs est intéressante en tant qu'ils constituent des modèles réduits des bassins océaniques.

L'allure des courbes granulométriques cumulatives (en ordonnées de probabilité ou en ordonnées simples) montre que le sédiment est moyennement à mal classé, et mal trié (fig. 3.25 et 3.26.). Cela correspond au faible trajet du matériau jusqu'à son lieu de dépôt.

La calcul de la déviation standard (σ_1 , tableau 3.7.) montre que selon la classification de FOLK et WARD (1957), les échantillons 1 et 8 sont moyennement classés. Les échantillons constituant la séquence de BOUMA sont mal classés.

La valeur de "skewness" ou asymétrie de distribution (Sk_1), visualisée par la position de la médiane (Me) et de la moyenne (Mz) sur la figure, montre que l'échantillon 1 est symétrique. Les échantillons 6 et 8 ont une asymétrie négative, c'est-à-dire vers les éléments fins. Les échantillons 2, 3, 4, 5, 7 ont une asymétrie positive, c'est à dire vers les éléments grossiers.

Le niveau A (échantillons 2 et 3), le plus grossier de la séquence de BOUMA, montre une augmentation de la médiane et du diamètre moyen vers le sommet. De plus, l'asymétrie positive est plus importante vers le sommet que vers la base. Ces faits sont significatifs d'un granoclassement inverse.

Le diagramme triangulaire (fig. 3.27.) montre que les lamines encadrant la séquence (1 et 8) sont de la même famille que celles des autres prélèvements dans la retenue. Les autres éléments du prélèvement C 21 s'en distinguent très nettement.

Le diagramme de PASSEGA (fig. 3.28.) montre que les échantillons 1 et 8 se situent exactement dans l'ensemble précédemment défini pour le prélèvement CT 7 (fig. 3.15.). Celui-ci était parallèle au segment OP (sédiment roulé avec quelques particules en suspension).

Les autres niveaux correspondent à des sédiments déposés par des courants de plus forte énergie, particulièrement (2) et (3) qui montrent un diamètre moyen trop important pour pouvoir être situés dans le diagramme. La comparaison entre les courbes cumulatives en ordonnée arithmétique et en ordonnée de probabilité permet de faire une distinction entre les échantillons 1 et 8 (fig. 3.25 et 3.26). Les courbes en ordonnée de probabilité ont une allure brisée qui accentue la différence de pourcentage vers les éléments grossiers, preuve que plusieurs modes de dépôt interviennent conjointement (VISHER, 1969).

3.4. - CONCLUSIONS

L'étude sédimentologique a révélé que les matériaux déposés dans la retenue du Chambon sont pauvres en argile. Les maximums sont 30 % de particules inférieures à 4 microns et 8 % inférieures à 2 microns. globalement, les échantillons étudiés ont rarement plus de 10 % d'argile (inférieure à 4 microns).

Cette première constatation implique que les phénomènes de sédimentation calme sont presque inexistants. L'image classique du lac de boue décantant juste à l'amont du barrage n'est vraie que pour les lacs de grande dimension, c'est-à-dire ceux où les courants de turbidité charriant les matériaux perdent toute leur énergie avec la distance de transport. Dans ce cas, les matériaux silteux se déposent plus en amont, formant un delta de progradation.

L'apport de matériaux solides dans la retenue du Chambon se fait non seulement par la Romanche, mais aussi par de nombreux torrents et particulièrement celui de la Pisse. Le tri granulométrique de l'amont vers l'aval de la retenue ne se fait pas pour les sables, silts et argiles. Cela est visible dans l'examen des courbes granulométriques des terrasses, c'est-à-dire du prélèvement en aval du delta du torrent de la Pisse (CT1 - CB1) et celles du prélèvement de la grande terrasse de rive droite (CT7). Cette dernière montre dans l'ensemble une granulométrie plus fine pour les niveaux silto-argileux bien que située plus en amont. L'influence du torrent de la Pisse est donc déterminante.

Par ailleurs, des matériaux très grossiers (galets) sont observables à l'amont de la retenue et dans l'axe du chenal. Les figures de chenalisation observées dans la retenue, ainsi que la turbidité du delta du torrent de la Pisse, témoignent de l'énergie importante des courants. L'absence de niveaux très argileux semble militer en faveur de courants exclusivement de fond (inféoflux), ce qui correspond à la définition de GOULD (1960).

Cette absence peut s'interpréter par le fait qu'en hiver, le lac étant à un niveau très bas (fig. 1.6.), les argiles susceptibles de décanter ne vont se déposer que dans la zone proche du chenal. Les courants de turbidité dus à la fonte des neiges vont emporter le peu d'argile susceptible de s'être déposé. CHIKITA (1977) a particulièrement insisté sur l'importance de la fonte des neiges dans l'apparition de courants de turbidités dans les lacs artificiels. Au niveau des terrasses, la rythmicité s'établirait ainsi : dépôts de lamines au printemps et en été, chaque crue se marquant par un niveau plus grossier, arrêt de la sédimentation en hiver.

La dynamique de cette sédimentation peut s'étudier en combinant les paramètres granulométriques. Nous en avons vu un premier exemple précédemment avec le diagramme de PASSEGA. La situation des points dans ce diagramme confirme la forte énergie des courants responsables de la mise en place des sédiments.

L'aplatissement et l'asymétrie ont été corrélés au diamètre moyen (fig. 3.29. et 3.30.). On constate une grande dispersion des résultats. Ces diagrammes

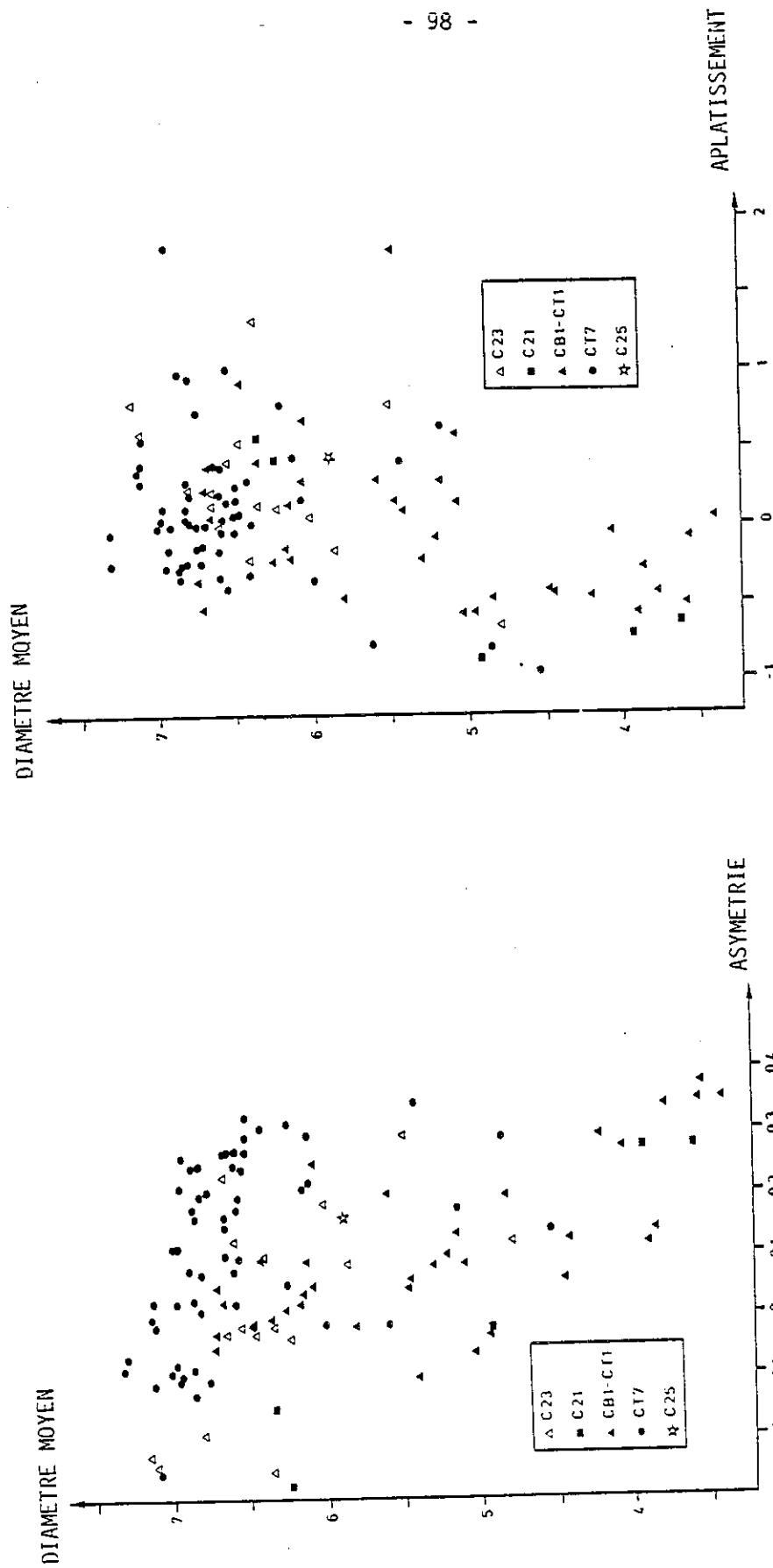


Figure 3.29. : Corrélation entre le diamètre moyen et l'aplatissement.

Figure 3.30. : Corrélation entre le diamètre moyen et l'asymétrie.

permettent de visualiser la séparation des prélèvements par leur diamètre moyen,

La figure 3.29, montre qu'il n'y a pas de corrélation entre le diamètre moyen et l'aplatissement (paramètres statistiques obtenus par analyses granulométriques au Coulter-Analyser). Les 113 échantillons représentés montrent un diamètre moyen compris entre - 0,9 et 1,8 ϕ .

Il n'y a pas de séparation nette entre les séries d'échantillons. Toutefois la série CT7 montre la plus faible dispersion. Les échantillons ont un diamètre moyen plus faible que ceux des autres séries. Le prélèvement CT7, bien qu'étant le plus en amont, reçoit moins de sédiments grossiers (exception faite des zones de chenalisation). Les autres prélèvements, à proximité du delta de la Pisse, reçoivent des sédiments dont le trajet est court. C'est ce qui explique leur diamètre moyen plus élevé et leur plus grande dispersion dans le diagramme.

La figure 3.30 montre que lorsqu'on met en relation le diamètre moyen et l'asymétrie, une faible corrélation négative* existe pour chaque famille d'échantillons. L'asymétrie est comprise entre - 0,28 et 0,38 ϕ . L'asymétrie positive prédomine. Elle montre que le classement est maximal du côté des éléments grossiers, ce qui doit être attribué au mode de dépôt (courants d'inféoflux).

Nous résumerons ci-après nos conclusions relatives au mode de dépôt des alluvions dans la retenue du Chambon.

Nous n'avons pu mettre en évidence, dans notre faciès à lamines, quoi que ce soit qui relève d'une périodicité annuelle. Nous avons constaté d'autre part, lorsque des datations et des comptages étaient possibles, que ces lamines se déposaient en grand nombre chaque année (54 lamines pour l'un des prélèvements entre les vidanges de 1980 et 1981). Rien donc qui soit comparable aux varves de DE GEER.

Ainsi, par ces observations et l'observation des paramètres granulométriques, nous avons été conduits à l'idée que des courants d'inféoflux sont responsables de la genèse de ce faciès. Ceux-ci correspondent à des épisodes de crues plus ou moins accentués et plus ou moins prolongés, liés à la fonte des neiges, mais se poursuivant aussi, quoique de façon moindre, jusqu'à l'automne, du fait des orages d'été et de la fonte des glaciers.

* Une corrélation entre deux paramètres est dite négative si l'un augmente lorsque l'autre diminue

CHAPITRE 4 : COMPOSITION DES ALLUVIONS

4.1. : TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE

4.2. : MINERALOGIE DES ALLUVIONS

4.3. : COMPARAISON DE LA MINERALOGIE DES ALLUVIONS AVEC
CELLE DES ROCHES DU BASSIN VERSANT

4.4. : CONCLUSIONS

Nous poursuivons l'étude des alluvions du Chambon pour la détermination, tant qualitative que quantitative, de leur composition, dans le but de mettre en évidence les différences éventuelles entre les lamines d'une part, et afin de préciser leur origine d'autre part.

L'analyse minéralogique par diffraction X était la plus adaptée, dans le cadre des techniques mises à notre disposition, pour mener à bien cette étude. Le principe de l'analyse semi-quantitative est exposé en annexe de ce mémoire.

4.1. - TENEUR EN MATIERE ORGANIQUE

10 échantillons du prélèvement CT7, préalablement étuvés à 105 °C pendant 24 heures, ont été placés pendant 2 heures dans un four à 400 °C. Cette méthode permet d'obtenir rapidement une valeur approchée de la teneur en matière organique.

Les résultats sont homogènes : 2 à 3,5 % de matière organique avec une moyenne de 2,15 %.

L'activité organique dans la lac du Chambon est faible, ce qui est compréhensible, les importantes variations de son niveau en faisant un biotope peu favorable.

4.2. - MINERALOGIE DES ALLUVIONS

4.2.1. - La méthode

Tous les diffractogrammes ont été réalisés à l'Institut Dolomieu à l'aide d'un appareil Philips à anticathode de cuivre et monochromateur de lithium. Les autres caractéristiques sont les suivantes : fente de divergence 1°, fente de réception 1°, largeur de la préparation 20 mm. On a des pertes d'intensité pour 2θ inférieur à 18,1°, soit supérieur à $4,91 \cdot 10^{-1} \text{ nm}$.

Dans le but de déterminer la composition minéralogique de nos échantillons, différentes analyses ont été réalisées :

- poudre totale non orientée, neutre ;
- poudre totale orientée ; neutre, chauffée , éthylène glycolée ;
- fraction inférieure à 2 microns : neutre, chauffée, éthylène glycolée.

Chacun des diffractogrammes ont montré exclusivement la présence des minéraux suivants (fig. 4.1.) :

- chlorite
- illite (et micas)
- quartz
- feldspaths potassiques
- plagioclases
- calcite

Les dolomies et calcaires dolomitiques triasiques présents dans le bassin versant se trouvent en trop faible quantité pour que la dolomite puisse être mise en évidence par les diffractogrammes.

Les analyses semi-quantitatives ont été effectuées sur des poudres placées dans un porte échantillon permettant la désorientation des particules. Une orientation des particules aurait favorisé les phyllites au détriment des autres minéraux.

4.2.2. - Les résultats

Les nombreuses analyses effectuées montrent que les teneurs minéralogiques varient peu, que ce soit dans une même série ou entre les diverses séries (tableau 4.1).

Cette homogénéité est visualisée sur les diagrammes triangulaires (quartz, calcite, chlorite + illite + feldspaths) (fig. 4.2.).

Cette représentation permet de constater une légère augmentation de la dispersion pour les fractions inférieures à 63 microns des échantillons du prélèvement CB1.

Une autre série d'analyses a consisté à rechercher si la composition minéralogique était identique entre les différentes classes granulométriques.

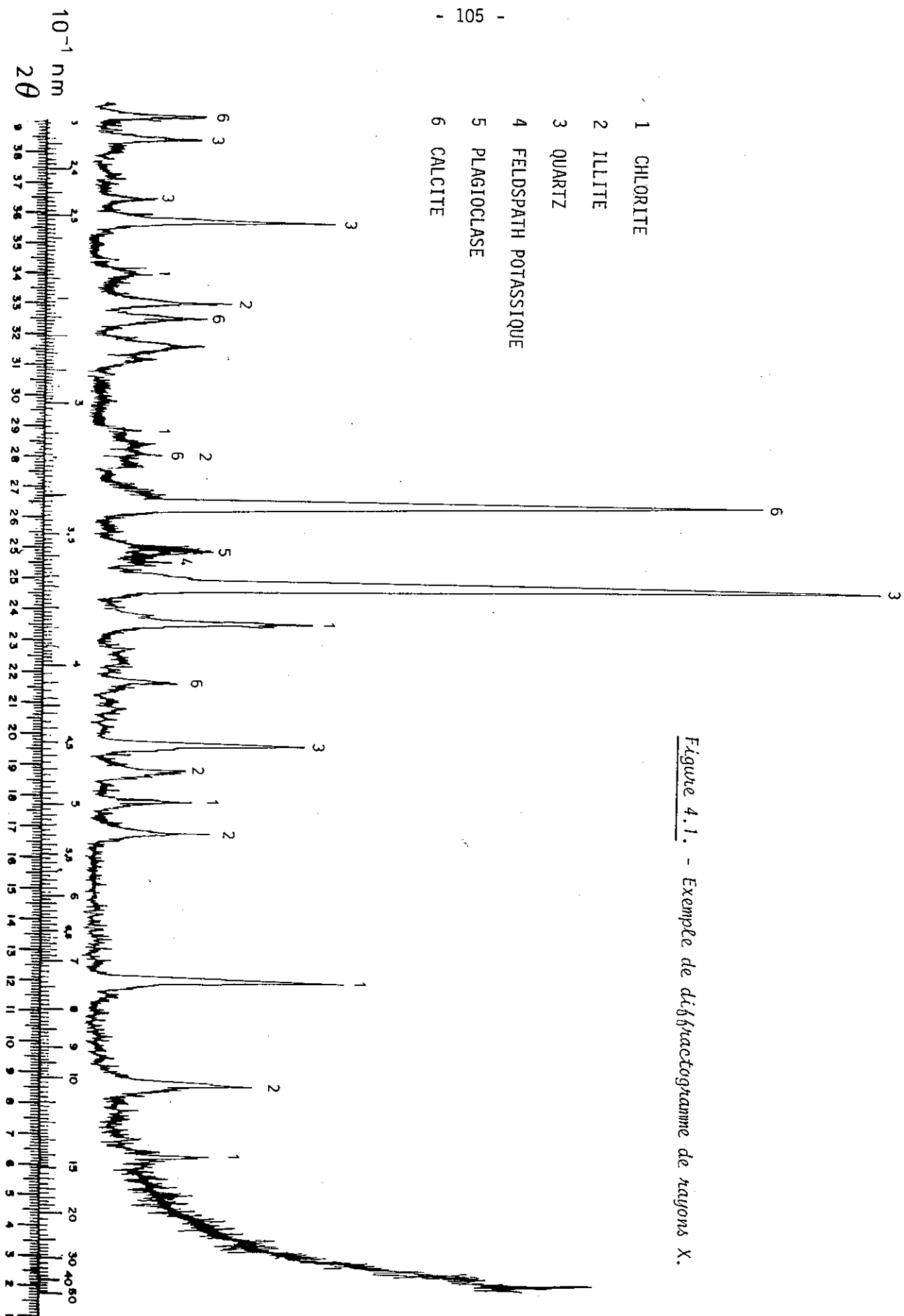


Figure 4.1. - Exemple de diffractogramme de rayons X.

Pré- vement n°	Nbre d'analy- ses	Chlorite %	Illite %	Quartz %	Feldspaths potassiques %	Plagio- clases %	Calcite %
CB1 total	24	9 à 16 (13,6)	19 à 34 (23,9)	26 à 40 (32,6)	4 à 8 (5)	4 à 8 (5,6)	8 à 31 (19)
CB1 < 63 µ	24	8 à 15 (12,5)	18 à 31 (26,6)	25 à 46 (31,6)	3 à 9 (4,8)	3 à 9 (5,3)	10 à 36 (20,5)
CT1 total	82	6 à 17 (12,3)	22 à 50 (30)	14 à 43 (27,5)	3 à 15 (4,7)	2 à 7 (4,7)	8 à 30 (20,7)
CT1 < 63 µ	6	12 à 14 (13)	22 à 28 (25,8)	26 à 38 (32,5)	4 à 7 (4,6)	4 à 6 (4,8)	15 à 24 (19,3)
CT7 total	78	7 à 16 (12,1)	18 à 37 (26,3)	14 à 40 (26,9)	3 à 14 (5)	3 à 10 (5,5)	16 à 31 (22,5)
CT7 < 63 µ	25	9 à 17 (12,9)	18 à 37 (24,8)	24 à 36 (28,2)	2 à 8 (4,8)	3 à 8 (4,8)	17 à 35 (24,1)
CT4 total	12	9 à 14 (11)	23 à 45 (27)	19 à 32 (25,8)	3 à 7 (5,1)	3 à 7 (5,2)	18 à 31 (24,7)
C23 < 63 µ	12	11 à 16 (13,1)	25 à 32 (28,5)	23 à 32 (27,2)	5 à 7 (6)	5 à 10 (6,5)	16 à 24 (19)
CT8 < 63 µ	10	10 à 18 (13,9)	20 à 29 (23,2)	26 à 33 (31,9)	5 à 16 (7,7)	4 à 16 (6,5)	7 à 22 (18,4)
Moyennes (total)	196	12,3	27,5	27,8	4,9	5,2	21,5
Moyennes (63 µ)	77	12,9	25,8	29,9	5,3	5,4	21,1

Tableau 4.1. - Teneurs minéralogiques des poudres totales et des fractions granulométriques inférieures à 63 microns. Les chiffres entre parenthèses indiquent les moyennes

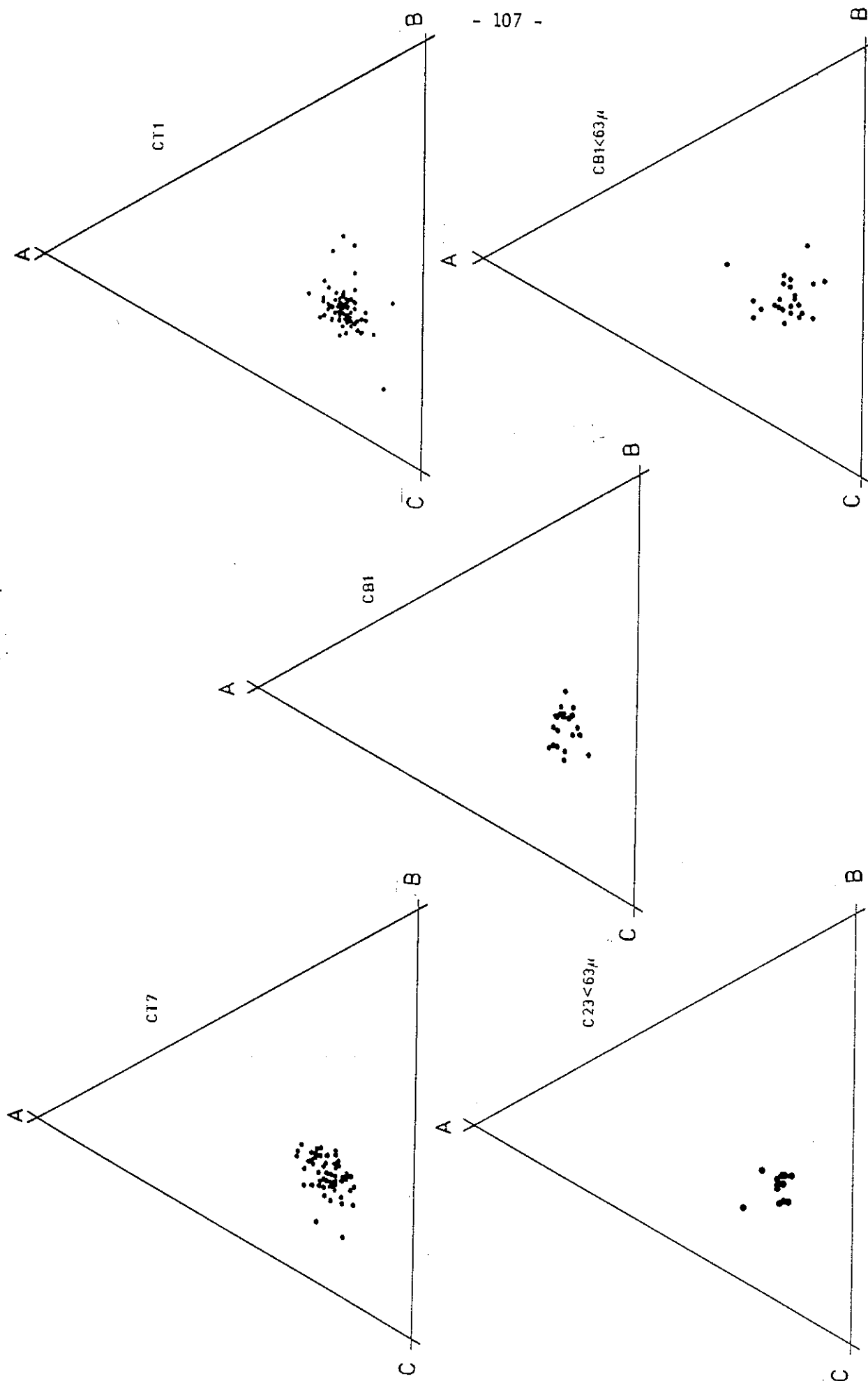


Figure 4.2.- Composition minéralogique des poudres totales et des fractions inférieures à 63 microns.
A - CALCITE, B - QUARTZ, C - FELDSPATHS + ILLITE + CHLORITE.

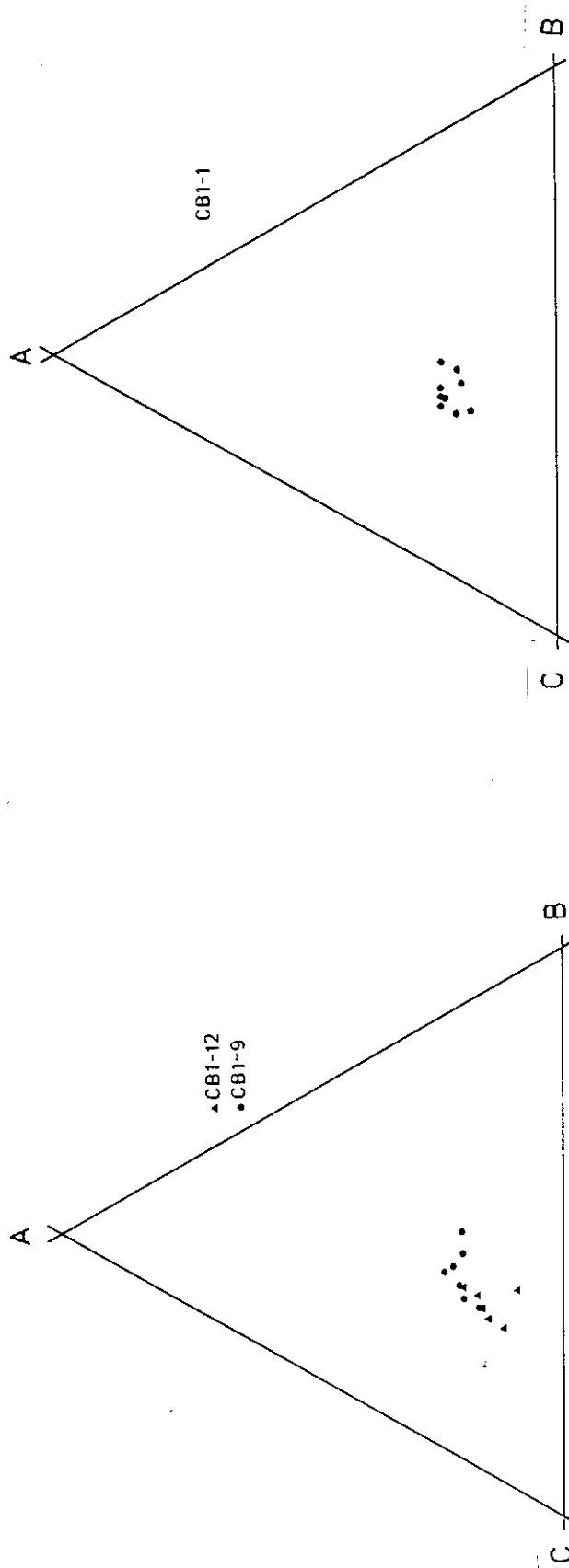


Figure 4.2.1. - Composition minéralogique des diverses fractions granulométriques (de supérieure à 2 mm à inférieure à 63 microns), d'un même échantillon.

Les résultats reportés en diagrammes triangulaires (figure 4.2.1.), montrent qu'on n'observe pas de variation significative de la la fraction la plus grossière, supérieure à 2mm, à celle inférieure à 63 microns.

D'autre part, nous avons cherché si une relation pouvait être mise en évidence entre la composition minéralogique et la granularité des lamines. Pour celà, les teneurs en quartz, calcite, illite ont été respectivement reportées en fonction du diamètre moyen (fig. 4.3., 4.4. et 4.5).

Les diamètres moyens des échantillons CT7 sont trop regroupés pour qu'une loi de corrélation puisse être dégagée. En ce qui concerne les échantillons CT1 - CB1, une faible corrélation positive s'observe entre la teneur en quartz et le diamètre moyen, de même qu'une faible corrélation négative entre les teneurs en illite et le diamètre moyen ainsi qu'entre les teneurs en calcite et le diamètre moyen.

Ces résultats semblent être confirmés par ceux des analyses sur les fractions inférieures à 2 microns (tableau 4.2).

nombre d'analyses	chlorite %	illite %	quartz %	feldspaths potassiques	plagioclases %	calcite %	cristallinité de l'illite
28	8 à 14 (11,1)	37 à 50 (45)	6 à 12 9,8	8 à 12 (10)	5 à 11 (6,5)	20	3 à 5 (3,4)

Tableau 4.2. - Teneurs minéralogiques des poudres des fractions granulométriques inférieures à 2 microns. Les chiffres entre parenthèses indiquent les moyennes.

La composition minéralogique des poudres non orientées des fractions granulométriques inférieures à 2 microns a été étudiée sur 28 échantillons. La teneur en calcite est la moyenne obtenue par calcimétrie sur 5 échantillons, les autres échantillons ayant été décalcifiés avant leur passage en diffractométrie.

Qualitativement, les compositions sont identiques aux fractions granulométriques supérieures. D'un point de vue quantitatif, on note une augmentation des teneurs en illite et en feldspaths potassiques, ainsi qu'une baisse du quartz.

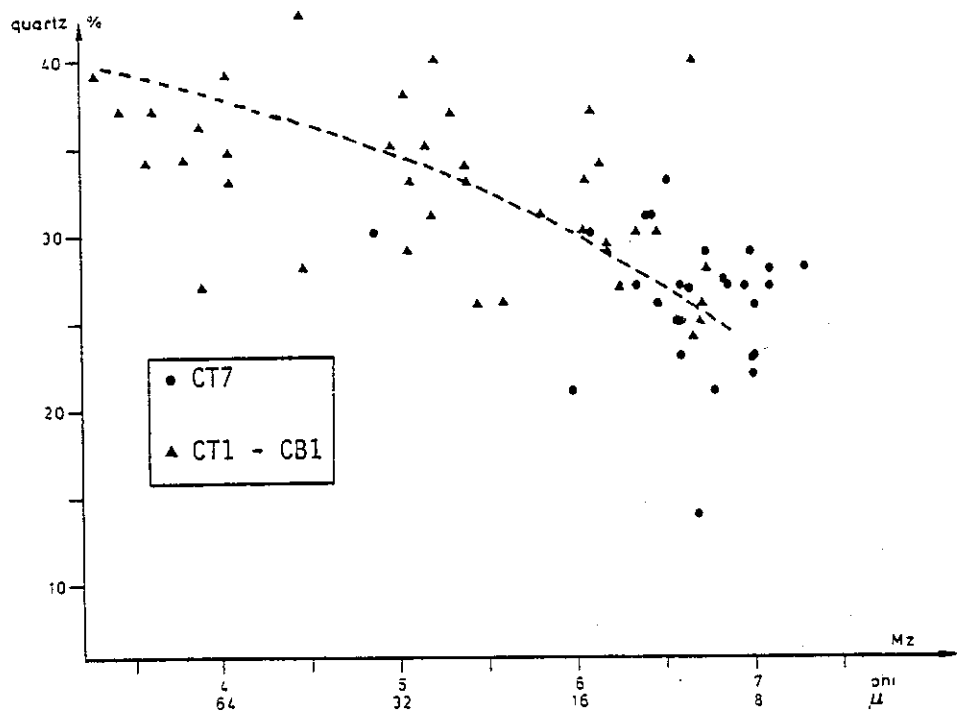


Figure 4.3. - Corrélation entre la teneur en quartz et le diamètre moyen.

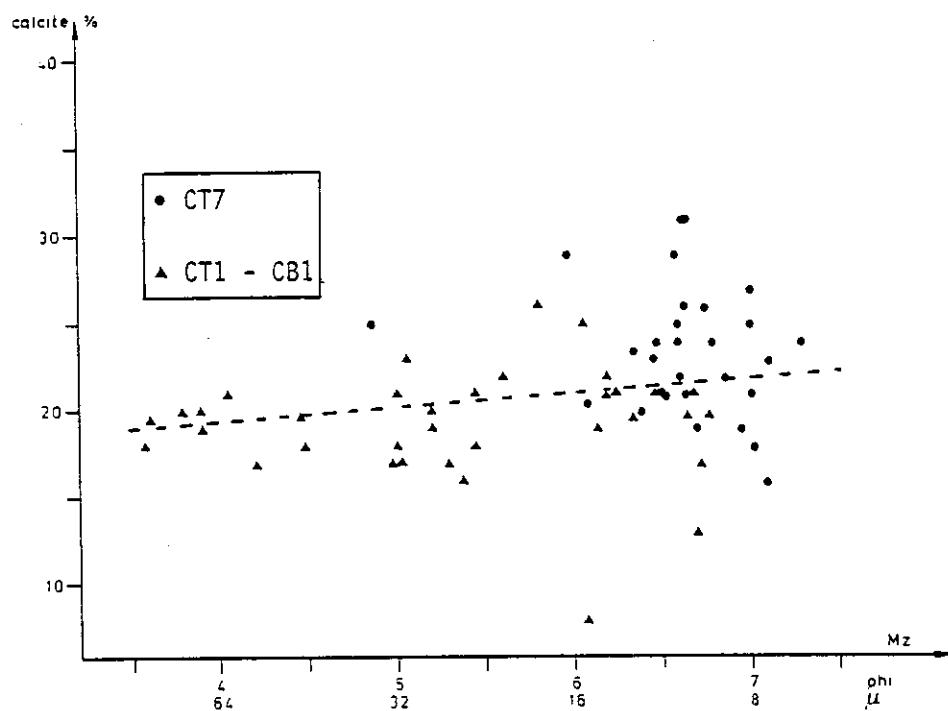


Figure 4.4. - Corrélation entre la teneur en calcite et le diamètre moyen.

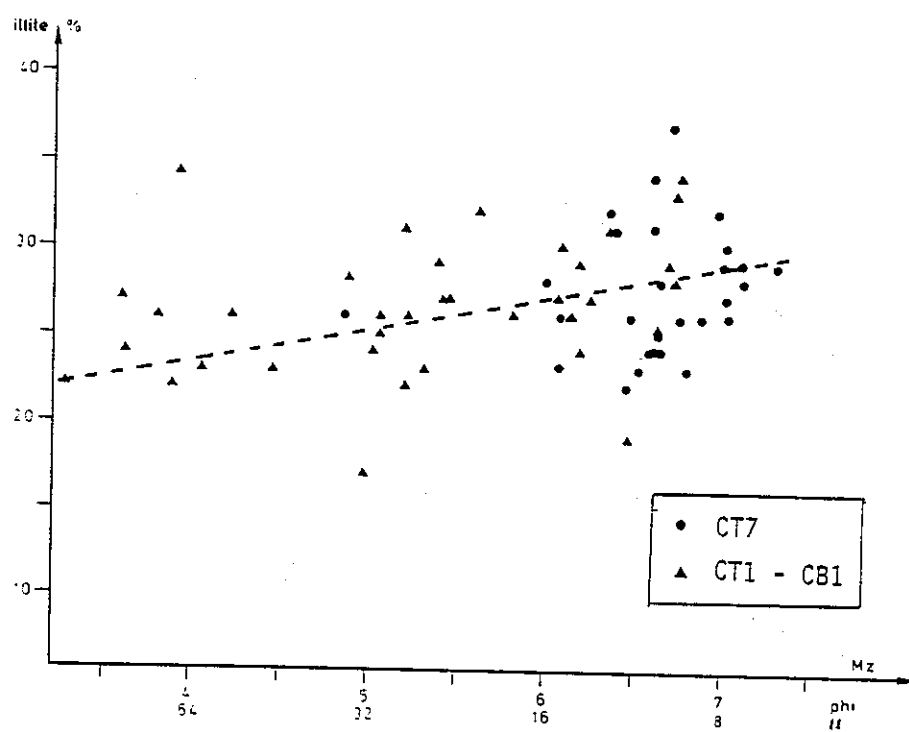


Figure 4.5. - Corrélation entre la teneur en illite et le diamètre moyen

Le quartz ne peut, du fait de sa dureté, s'éroder suffisamment pour que sa teneur reste constante des fractions grossières aux argiles. Remarquons qu'à ce niveau de granulométrie, le pic à 10 Å correspond essentiellement à de l'illite pure, contrairement aux fractions plus grossières où nous avons un mélange micas + illite.

La cristallinité de l'illite a été mesurée selon la méthode de KUBLER (1964 et 1968) - largeur en mm à mi-hauteur de la raie de l'illite à 10 Å. Rappelons que cette méthode aboutit à un "indice de cristallinité" représenté par un chiffre repère, d'autant plus élevé que la cristallinité est faible.

4.3. - COMPARAISON DE LA MINÉRALOGIE DES ALLUVIONS AVEC CELLE DES ROCHES DU BASSIN VERSANT

4.3.1. - Les schistes du Lias

Du fait de leur forte érodabilité et de leur étendue dans le bassin versant (43 %) les schistes du Lias fournissent l'essentiel des alluvions.

Les résultats d'analyses de roches prélevées par J.P. GRATIER ont permis de déterminer la composition minéralogique des schistes du Lias (localisation des prélèvements sur la figure 3.8.).

Le tableau 4.3 résume les résultats du dépouillement des diffractogrammes de rayons X sur les poudres totales de roches. Ces diffractogrammes n'ont pas révélé d'autres minéraux que ceux du tableau.

La première constatation qui s'impose est que les schistes du Lias et les alluvions du Chambon présentent le même cortège minéral. Les analyses semi-quantitatives révèlent une nette prédominance de la teneur en illite dans les schistes.

Référence de l'échantillon	ML1	ML2	ML3	Mi1	Mi2	Moyennes
Stratigraphie	Lias Aalenien schisteux					
Diffraction X						
Chlorite %	13	12	7	19	22	14,6
Illite %	30	38	33	33	48	36,4
Quartz %	24	19	20	22	17	20,4
Felspaths K %	4	2	1	2	2	2,2
Plagioclases %	3	2	1	3	2	2,2
Calcite %	27	28	38	21	9	24,6
Détermination de la chlorite *						
x (Al)	1,52	1,61	1,53	1,59	1,67	1,60
y (Fe ²⁺)	2,25	2,25	2,35	3,2	2,9	2,59
Classification de HEY	Pseudothuringite					
Classification de FOSTER	Ripidolite					
Cristallinité de l'illite	2,1	2,3	2,0	2,6	2,2	2,24

Tableau 4.3. - Minéralogie des schistes du Lias dans le bassin versant de la Romanche.

* Le principe de la détermination des chlorites est exposé en annexe.

La chlorite est légèrement plus importante dans les schistes que dans les alluvions. De même pour la calcite. Ceci est compensé par un plus faible pourcentage en quartz et en feldspaths dans les schistes.

Les chlorites des alluvions et des schistes sont des ripidolites selon la classification de FOSTER. Toutefois la classification de HEY, plus détaillée, permet de différencier les chlorites en deux familles : pseudothuringites et ripidolites. Les premières sont plus ferrifères et plus alumineuses (fig. 4.6).

La cristallinité moyenne de l'illite du Lias est de 2,2. Cette valeur correspondant à une cristallinité d'épizone, est légèrement plus forte que celle attribuée au Houiller et au Lias de cette région par APRAHAMIAN (1974) : 2,8.

Remarquons la plus faible cristallinité de l'illite des alluvions (environ 3,4) par rapport à celle du Lias (environ 2,2).

4.3.2. Le cristallin du Massif de la Meige

Les échantillons du granite de la Meige étudiés par LEFORT et PECHER (1971) ont montré la composition suivante (au microscope) :

- 32 % de quartz,
- 29 % de feldspath potassique,
- 37 % de plagioclase (albite)
- 2 % de biotite souvent chloritisée.

D'après PECHER (1971), les granites migmatitiques et les gneiss se caractérisent au microscope par un assemblage de quartz, plagioclase, feldspath potassique, biotite (souvent chloritisée) et de minéraux accessoires. Ce cortège minéral est identifié dans les alluvions de la retenue du Chambon.

La composition du granite de la Meige montre surtout une teneur beaucoup plus importante en feldspaths potassiques et plagioclases que les alluvions du Chambon. L'ensemble cristallographique micas, chlorite est peu représenté dans le granite.

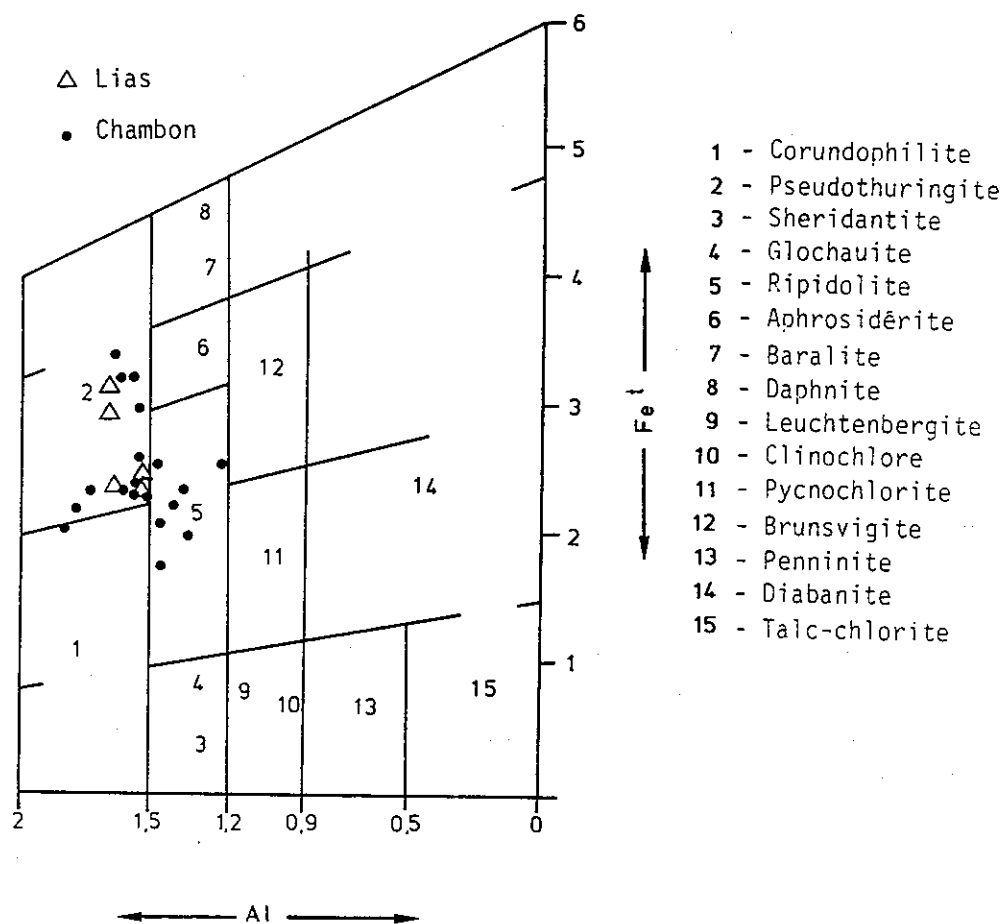


Figure 4.6. - Détermination des chlorites des alluvions et de celles du Lias, selon la classification de HEY 1954.

4.4. - CONCLUSIONS

Les alluvions du Chambon sont très homogènes dans leur composition. Leur teneur en matière organique est faible (environ 2 %). L'analyse minéralogique montre la présence de chlorite (12 %), illite (28 %), quartz (28 %), feldspaths potassiques (5 %), plagioclases (5 %), calcite (22 %). Les teneurs restent sensiblement constantes depuis les fractions granulométriques supérieures à 2 mm jusqu'à celles inférieures à 63 μ .

Dans les fractions inférieures à 2 microns, l'illite prédomine ; ce qui est compensé par une forte diminution de la teneur en quartz.

La comparaison entre les compositions minéralogiques des roches du bassin versant et des alluvions du Chambon permet de faire les remarques suivantes :

- les schistes liasiques et les alluvions montrent le même cortège minéral. Les teneurs plus élevées en quartz et en feldspaths dans les alluvions témoignent de la contribution du cristallin à l'alluvionnement;

- d'autre part, les différences de cristallinité de l'illite entre le Lias et les alluvions semblent montrer qu'une faible néoformation existe. Celle-ci doit être recherchée dans une évolution minéralogique à partir des produits issus de l'altération glaciaire des roches (moraines wurmiennes et glaciers actuels).

Ainsi les phénomènes d'héritage dominant sur la néoformation.

Comme pour d'autres lacs périglaciaires précédemment décrits (cf. 2.2.) les alluvions du Chambon montrent une forte teneur en illite.

CHAPITRE V : ETUDE QUANTITATIVE DE L'ALLUVIONNEMENT

5.1. : ESTIMATION DU TAUX D'ALLUVIONNEMENT A PROXIMITE DU
BARRAGE .

5.2. : ESTIMATION DES VOLUMES D'ALLUVIONS

5.3. : LES FACTEURS D'EROSION

5.4. : CONCLUSION : CONSEQUENCES DES VIDANGES SUR L'ALLUVIONNEMENT

5.1. - ESTIMATION DU TAUX D'ALLUVIONNEMENT A PROXIMITE DU BARRAGE

A l'aide des relevés effectués au pied du barrage lors de vidanges, ou par des sondages bathymétriques par ultrasons lorsque la retenue est pleine, il est possible d'estimer le taux d'alluvionnement à proximité de l'ouvrage. Malheureusement, ces relevés ne concernant qu'une zone limitée de la retenue, l'évaluation du volume total d'alluvions sédimentées ne peut être réalisée par ces méthodes.

5.1.1. - La vidange de 1960

En 1960, le plan de vase * se trouvait à la cote 968, soit à 18 m au-dessus de la vidange de fond.

La création d'une nouvelle vidange de fond utilisant un ancien tunnel routier à la cote 960 a été décidée après l'échec des travaux entrepris pour dégager la vidange de fond initiale.

Nous n'avons pas de données sur la cote du plan de vase antérieurement à 1960.

Les 18 m d'envasement en 1960 correspondent à un taux moyen de sédimentation de 0,72 cm par an depuis la première mise en eau. Mais l'apport réel est obligatoirement plus élevé, puisque l'on doit aussi tenir compte des quantités évacuées par soutirage (exploitation normale) et lors des vidanges intervenues durant cette période.

5.1.2. Les sondages par ultrasons

Des sondages par ultrasons ont été effectués dans la retenue du Chambon en mars 1960, mars 1972, mai 1973, mai 1974, mai 1977, avril 1979. Ils concernent la zone située au contact du barrage jusqu'à un maximum de 410 mètres en amont. C'est dans cette zone que le taux d'alluvionnement est le plus important, la vase étant piégée par le barrage. C'est aussi la zone la plus sollicitée lors des vidanges.

* Le "plan de vase" désigne la surface sommitale du dépôt alluvial sous-lacustre.

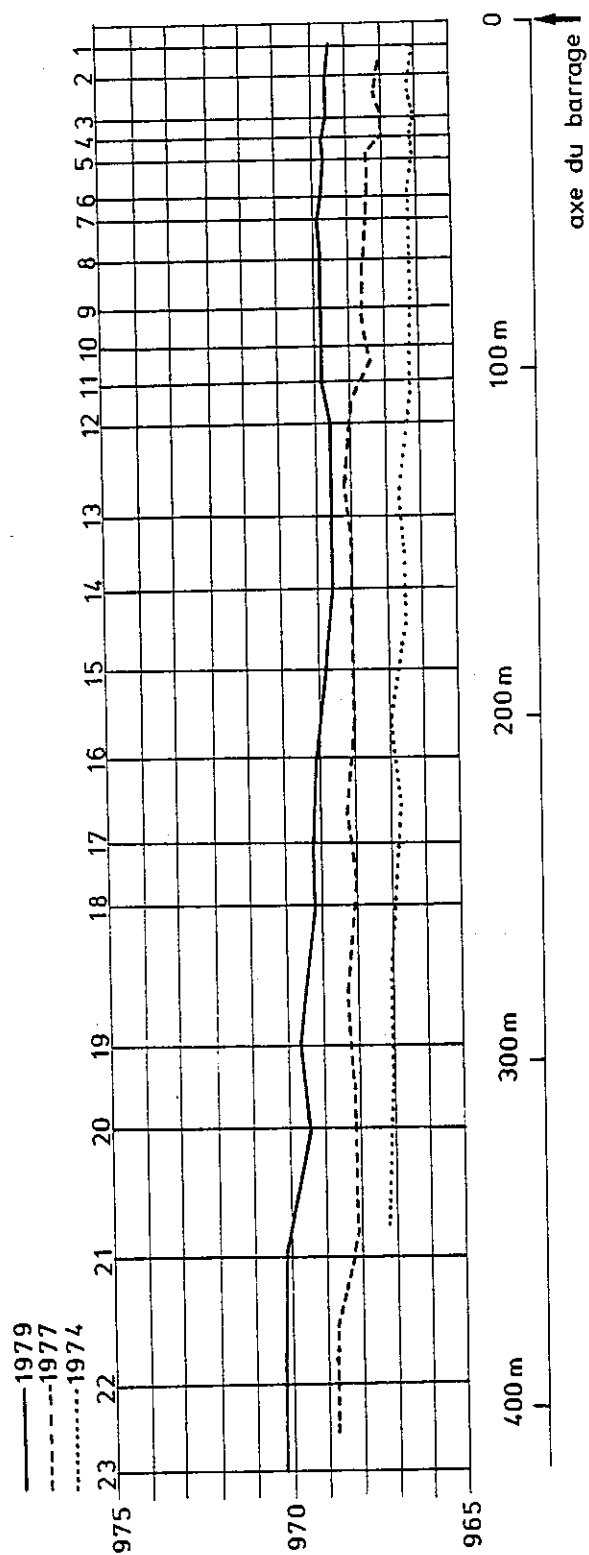


Figure 5.1. : Profils en long des échosondages de 1974, 1977, 1979, dans l'axe de l'ancien lit de la Romanche

Deux estimations du taux d'envasement sont possibles. L'une donne l'augmentation de l'épaisseur du dépôt selon une coupe en long suivant l'axe de l'ancien lit de la Romanche (fig. 5.1.) ; l'autre permet d'évaluer le volume déposé.

Cette dernière nécessite une double planimétrie à partir des 23 profils réalisés par échosondage.

L'évaluation (en mètres) de l'envasement est réalisée à partir d'une coupe en long selon l'axe de l'ancien lit de la Romanche (fig. 5.1). Il faut souligner que ces estimations concernent de la "vase" et non un sédiment compacté au sens où il a été pris pour l'estimation du volume total d'alluvionnement dans l'ensemble de la retenue depuis la première mise en eau. Toutefois les études sur la compaction des alluvions (cf. chap. 6.) ont montré que ceux-ci acquièrent rapidement une densité stable ($\gamma_d \simeq 1,3$ et $\gamma_h \simeq 1,8$). A titre de comparaison, des mesures effectuées lors de vidanges de nombreux barrages algériens (THEVENIN, 1960), montrent que la vase soutirée a une densité apparente (γ_h) de 1,5.

De plus, l'étude granulométrique a montré que le sédiment est plus limoneux (silteux) qu'argileux. La sédimentation est donc rapide, peu d'éléments se trouvant en suspension.

5.1.2.1. - Le sondage de 1972

La campagne de sondages s'est déroulée les 28 et 29 mars, soit une semaine après le début de la mise en eau consécutive à une vidange. On constate que cette dernière a particulièrement affecté la zone à proximité de l'ouvrage ainsi que le chenal.

En effet, l'envasement moyen près de l'ouvrage est de 3 mètres entre 1960 et 1972, alors qu'il est de 4,50 mètres en amont. La vase accumulée contre le barrage est évacuée plus facilement que celle se trouvant plus en amont.

L'essentiel des sédiments évacués par la vidange provient du chenal, dont la largeur varie de 50 à 80 mètres. On constate qu'entre 1960 et 1972, l'envasement a été faible, quelquefois nul.

5.1.2.2. - Comparaison des sondages de 1972 et 1973

La comparaison des résultats obtenus en 1973 par rapport à ceux de 1972 montre un envasement de 1,30 m. Cette valeur est très importante en regard de la moyenne. Cela est dû à la vidange de 1972. Le chenal a été fortement creusé. Il semble donc que les progrès de l'accumulation soient d'autant plus rapides que la vidange précédente est plus rapprochée dans le temps.

Le taux d'envasement élevé augmente jusqu'à un "taux d'équilibre" voisin du taux moyen calculé. Ce phénomène est celui de la mise en place du profil d'équilibre.

5.1.2.3. - Comparaison des sondages de 1974, 1977, 1979

La comparaison entre les sondages de 1974 et 1977 montre un taux moyen de sédimentation de 0,45 m par an, puis 0,60 m entre 1977 et 1979, soit une moyenne de 0,50 m par an entre 1974 et 1979. A titre de comparaison les prélèvements CT1 et CT7 (cf. chap. 3.) ont montré respectivement un taux d'alluvionnement annuel d'environ 4,5 cm et 30 cm. Le prélèvement CT1 correspond à une terrasse haute au niveau du delta du torrent de la Pisse. Le taux relativement élevé du CT7 en regard de l'éloignement par rapport au barrage est dû à la faible largeur de la retenue en cet endroit.

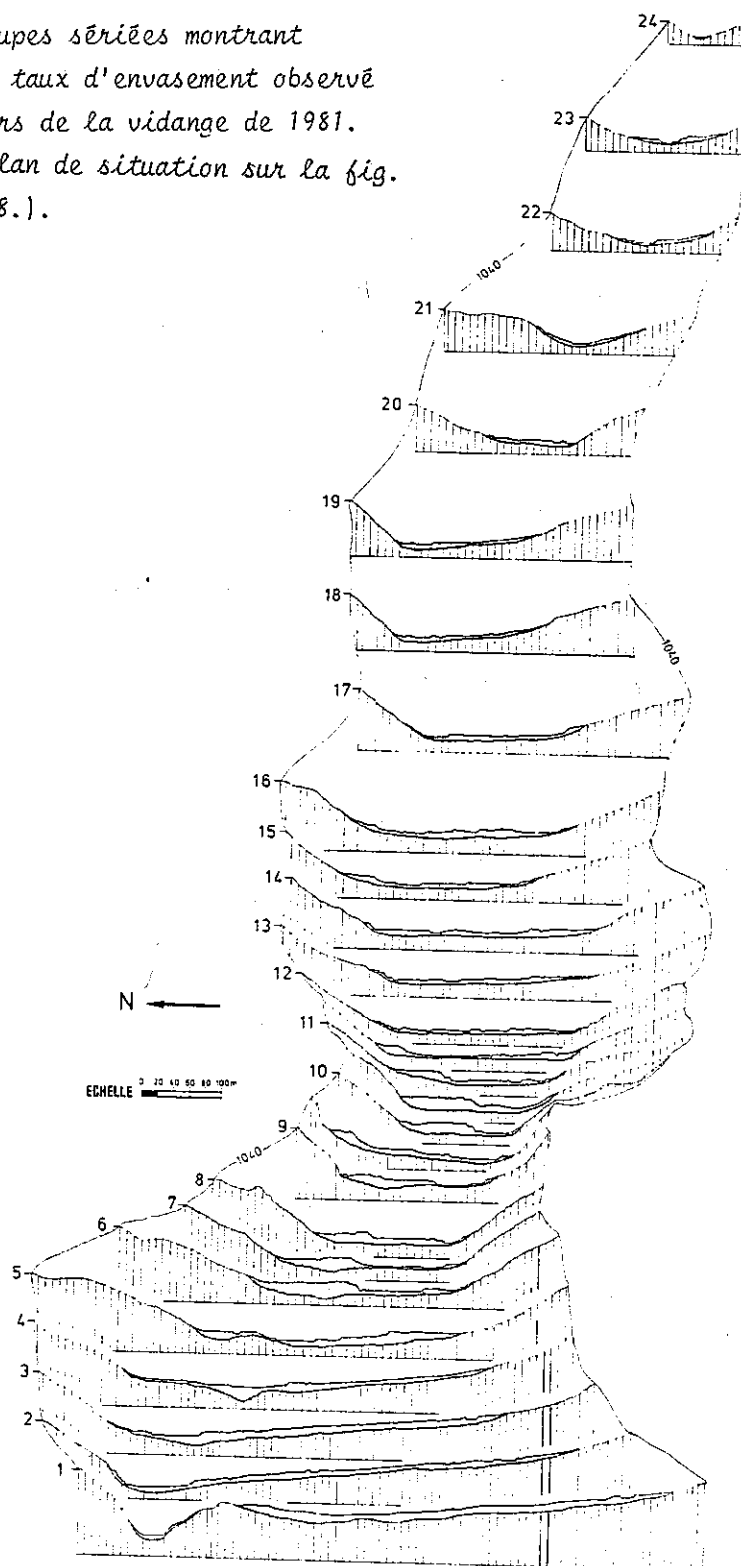
La comparaison des profils obtenus par ultrasons entre mai 1977 et avril 1979 montre un alluvionnement de $66\ 000\text{ m}^3$ dans la zone concernée (410 m en amont), soit une surface de 35 ha, correspondant à 25 % de la superficie totale de la retenue.

5.1.2.4. - Remarques sur la technique employée

La difficulté réside dans une parfaite localisation des lignes de sondage, condition impérative pour une comparaison valable avec les profils antérieurs. Un repérage topographique est donc nécessaire. Ceux-ci sont facilités par les travaux de bornage effectués par les services du GRPH Alpes au cours de l'été 1978. Bien que la précision des points sondés soit bonne, la superposition des profils montre des anomalies au niveau des berges.

La précision des mesures sur la profondeur est de l'ordre de 10 %.

Figure 5.2. : Coupes sérieées montrant
le taux d'envasement observé
lors de la vidange de 1981.
(Plan de situation sur la fig.
3.8.).



5.2. - ESTIMATION DU VOLUME D'ALLUVIONS

La finalité de cette étude est d'une part l'évaluation du volume d'alluvions piégées dans la retenue, d'autre part du volume libéré par les vidanges successives depuis la première mise en eau du barrage en 1935. A ce volume, s'ajoute celui évacué lors des turbinages.

Le principe adopté est la comparaison de deux cartes, l'une actuelle, l'autre antérieure à la mise en eau initiale. Pour cette dernière, le seul document existant était la carte topographique au 1/20000 datant de 1933. Ce document a été agrandi pour pouvoir être comparé avec la photogrammétrie réalisée lors de la vidange de mai 1981.

Le caroyage LAMBERT et la courbe de niveau 1040 (cote maximale du lac) ont été utilisés pour une bonne superposition des cartes.

Vingt huit coupes transversales à la retenue permettent de mesurer en mètres carrés selon ces sections, la quantité d'alluvions présente (fig. 5.2.). En planimétrant ces surfaces en fonction de la distance entre les coupes, on obtient les volumes cherchés (fig.5.

L'épaisseur des sédiments a été précisée par 15 sondages à la tarière à main ; 5 sondages carottés, 9 pénétromètres, 2 sondages électriques, 2 sondages sismiques, 8 relevés de coupes en bordure de terrasses. On constate ainsi que la comparaison des coupes à partir de la superposition des deux cartes est d'une précision très satisfaisante.

Les coupes de la figure 5.2. montrent le taux d'envasement observé lors de la vidange de 1981.

Afin d'obtenir une valeur voisine de l'alluvionnement depuis la première mise en eau, les terrasses ont été prolongées sur chacune des coupes, considérant que ce niveau aurait été atteint sans les vidanges et turbinages. Cette estimation est par défaut, du fait qu'une certaine quantité d'alluvions des terrasses est entraînée lors des turbinages et vidanges.

Par cette méthode, le volume des alluvions en place en mai 1981 est estimé à $3,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. La quantité des matériaux solides évacués du fait des turbinages et vidanges depuis la première mise en eau peut être évaluée à $1,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ainsi, on peut estimer que le volume total parvenu dans la retenue du Chambon depuis la première mise en eau est égal à la somme des deux précédents volumes, soit $5,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

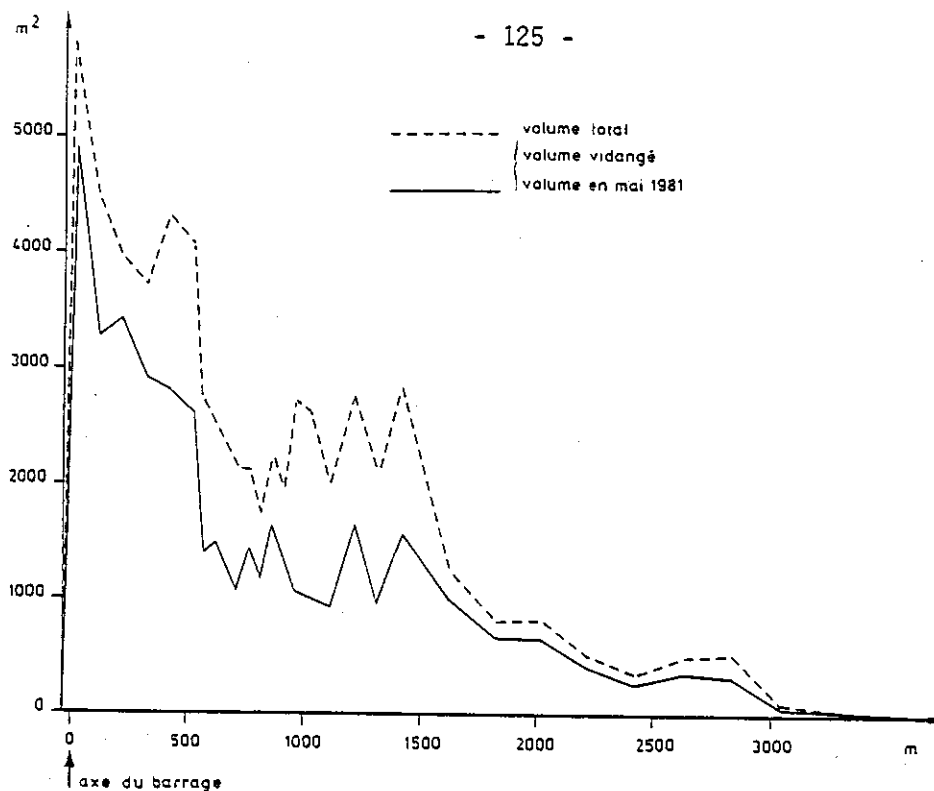


Figure 5.3. : Estimation des volumes d'alluvions admis puis évacués ou conservés.

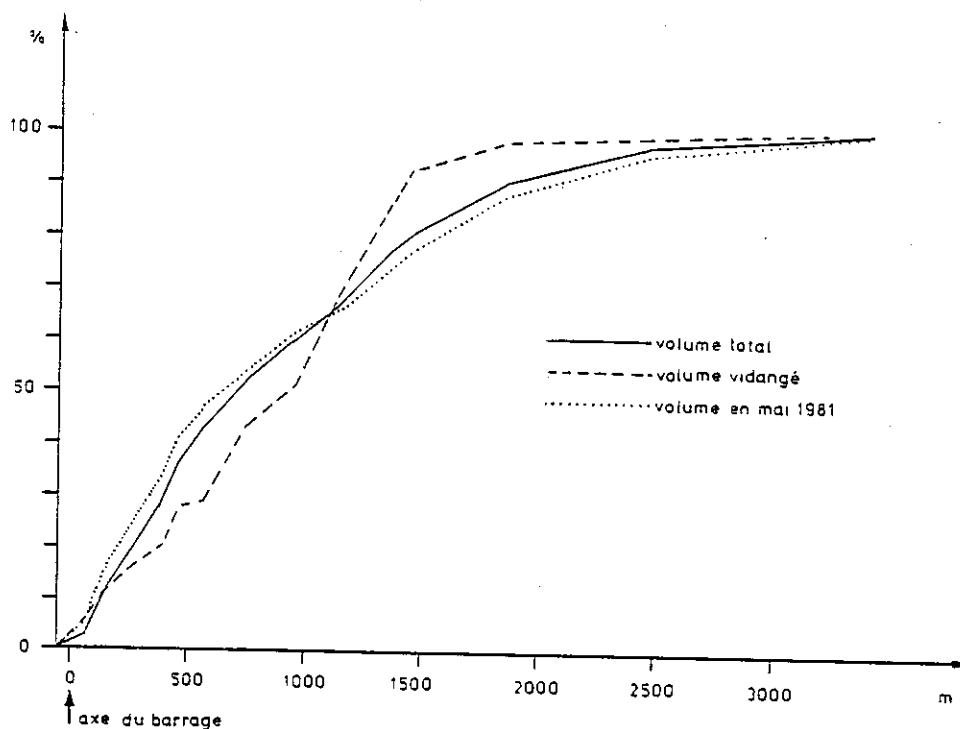


Figure 5.5. : Pourcentages d'alluvions admis puis évacués ou conservés, suivant la distance au barrage.

Le poids volumique sec de ces alluvions étant d'environ $1,3 \text{ t/m}^3$, les valeurs précédentes peuvent être transcrites en poids de matière sèche. On obtient $4,9 \cdot 10^6 \text{ t}$ pour le dépôt encore en place, et $2,1 \cdot 10^6 \text{ t}$ pour les sédiments libérés vers l'aval. Environ $7 \cdot 10^6 \text{ t}$ de matière sèche se sont déposées ou ont transité en 45 ans. On constate que vidanges et turbinages ont soustrait à la retenue 30 % de ce tonnage.

Pour tenir compte dans ces estimations du volume d'alluvions évacuées par turbinage lorsque l'usine de Saint Guillerme est en service, il aurait fallu posséder des relevés en continu sur une année de la charge solide des eaux turbinées.

Nous ne disposons que de deux valeurs de turbidité à la station Chambon amont les 11 et 18 mars 1981 : respectivement $0,02 \text{ g/l}$ et $0,113 \text{ g/l}$.

On peut estimer que la charge de l'eau turbinée (donc après que les sédiments se sont déposés) est certainement inférieure à 10^{-2} g/l , d'autant plus que nous avons montré que les pourcentages d'argile sont faibles. La quantité de particules en suspension est donc très petite.

Si l'on prend cette valeur de 10^{-2} g/l , si on la multiplie par les débits cumulés au barrage du Chambon, depuis la première mise en eau ($1,4 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$), on obtient une masse évacuée de $0,14 \cdot 10^6 \text{ t}$. Cela ne représente que 2 % du tonnage parvenu dans la retenue.

Ainsi, nous pouvons calculer les paramètres suivants :

Charge moyenne de l'eau :

$$7 \cdot 10^{12} \text{ g} : 1,4 \cdot 10^{13} \text{ l} \simeq 0,5 \text{ g/l}$$

Débit solide annuel

$$7 \cdot 10^6 \text{ t} : 45 \text{ ans} \simeq 1,5 \cdot 10^5 \text{ t/an}$$

Débit solide moyen journalier

$$1,5 \cdot 10^5 \text{ t} : 365 \text{ j.} \simeq 430 \text{ t/j}$$

Débit solide spécifique moyen annuel

$$1,5 \cdot 10^5 \text{ t} : 336 \text{ km}^2 \simeq 450 \text{ t/km}^2$$

Le débit solide spécifique moyen annuel de la Romanche peut être comparé à celui d'autres rivières (Comité Français des Grands Barrages, 1976).

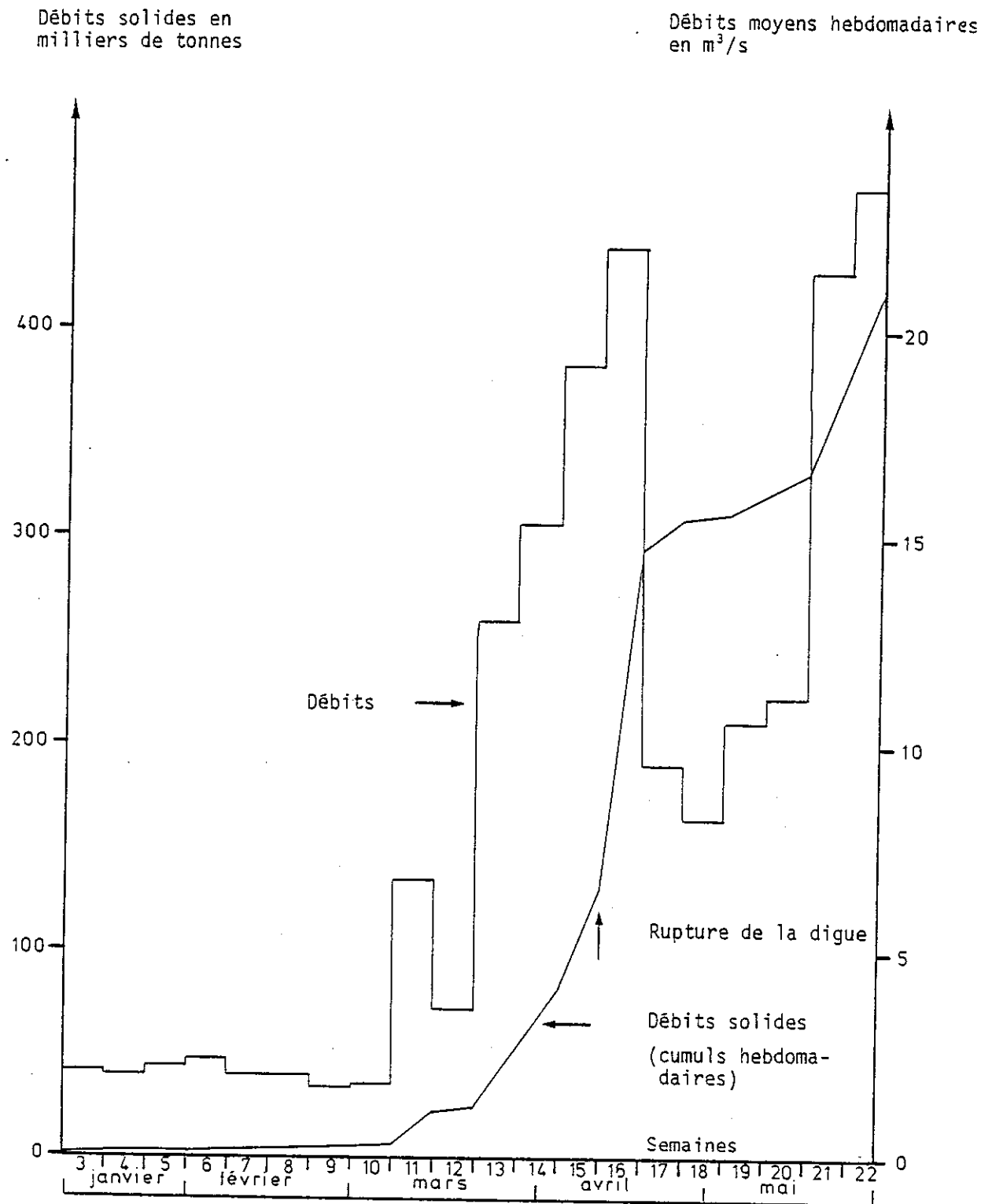


Figure 5.4. : Débits moyens hebdomadaires et débits solides cumulés lors de la vidange de la retenue du Chambon du 5 janvier au 31 mai 1981 (d'après documents E.D.F.).

Rivière	Bassin versant (km ²)	Débit solide spécifique moyen annuel	Précipitations moyennes annuelles (mm)
Isère	11 750	615	1 100
Drac	990	700	1 400
Durance	3 580	150	900

Par rapport au Drac, rivière dont le bassin versant présente des similitudes avec celui de la Romanche, le débit spécifique moyen annuel est inférieur.

Si on compare la valeur de la charge moyenne calculée (0,5 g/l) à celles mesurées à Chambon amont (0,02 g/l et 0,113 g/l), on constate que la turbidité des eaux affluentes est très variable.

Lors de la vidange de 1981, un turbidimètre a permis de chiffrer le volume d'alluvions arraché à la retenue. La figure 5.4. montre la dynamique de la vidange. Dans le cas d'un lac à boue, juste en amont du barrage, nous aurions eu immédiatement une turbidité importante puis décroissante. Cela n'a pas été le cas. Les valeurs relevées sont à mettre en relation avec les phénomènes d'érosion régressive des terrasses. Au début de la vidange, l'érosion du chenal accentue son creusement. Pendant toute la durée de la vidange, des glissements de terrain en bordure de terrasse provoquent une érosion régressive. Ce phénomène n'est pas seulement déduit de la morphologie de la retenue lors de la vidange, mais a été observé à de nombreuses reprises, et ceci d'autant plus que les débits de la Romanche étaient importants. C'est ce qui se vérifie lorsqu'on compare les débits cumulés de la Romanche et les débits solides vidangés.

La figure 5.4. donne la valeur du tonnage de matière sèche soutiré en 1981, soit $4,2 \cdot 10^5$ t. On peut comparer cette valeur à celle du débit solide annuel ($1,5 \cdot 10^5$ t). La vidange de 1981 a donc soutiré l'équivalent du dépôt solide de 2,8 années d'exploitation.

Il faut garder en mémoire qu'une précédente vidange a été réalisée en 1980. Nous ne possédons pas de données sur le tonnage évacué pendant cette période. Il est certain que sans cette vidange, une quantité beaucoup plus importante de sédiments aurait été évacuée en 1981.

5.3. - LES FACTEURS D'EROSION

Envisagés dans le premier chapitre, pour préciser l'hydrologie du bassin versant, les données climatiques doivent également être prises en compte lorsque l'on discute le phénomène de l'érosion.

VIVIAN (1979) a constaté que dans le bassin versant du barrage du Sautet sur le Drac (qui par sa climatologie et sa géologie possède de nombreux points communs avec celui du Chambon), "les transports solides se concentrent en deux pics, l'un en juin, l'autre en septembre". En juin, le sol saturé est à découvert du fait de la fonte du manteau neigeux. Le ruissellement emporte facilement ce matériau. Lorsque la fonte glaciaire prend le relai de la fonte nivale, l'écoulement se concentre dans les lits des torrents. Ceux-ci sont situés en aval du glacier de la Meige donc essentiellement sur du cristallin, beaucoup moins érodable que le Lias ou les moraines wurmiennes.

En septembre, l'augmentation de la charge solide est due aux précipitations qui remettent à l'ordre du jour l'écoulement diffus.

Les températures basses sont un facteur d'érosion. Elles favorisent l'éclatement et le délitage des roches, et l'accroissement de la solubilité du CO_2 , rendant les eaux plus agressives.

L'examen du cadre géologique et des photographies aériennes permet de distinguer les différentes formations géologiques en relation avec leur érodabilité (fig. 1.1.) :

- . le cristallin, malgré son relief est peu érodable ;
- . l'érosion se développe surtout en rive droite dans les formations tendres et schisteuses du Lias ;
- . les terrains de couverture sont fortement érodables, particulièrement les formations morainiques. Lors de la fonte des neiges, la matrice argileuse saturée peut être emportée par les eaux de ruissellement, libérant les galets qui se retrouveront en amont de la retenue et dans les zones de chenalisation du lac.

L'efficacité de l'érosion varie également avec l'importance et la nature du couvert végétal.

On doit distinguer dans le bassin versant de la Romanche deux types principaux de végétation : la forêt (épicéas dominants) et les alpages. La limite entre les deux se situe à environ 2 000 m.

Les photographies aériennes, ainsi que les observations faites sur le terrain, permettent de constater que la forêt s'implante très difficilement sur les versants sud, ou les zones d'éboulis vifs ou stabilisés sont importantes ; elle est par contre bien développée sur les versants nord (ubac).

Du point de vue de l'érodabilité, les alpages retiennent plus difficilement les terres que les forêts. Par conséquent, une déforestation importante (chantiers d'abatage, construction d'ouvrages, pistes pour le ski, etc...) provoquerait une croissance du taux d'érosion d'où un taux de sédimentation accru dans la retenue du Chambon. Nous avons ainsi voulu montrer qu'il est difficile d'évaluer précisément le taux d'érosion des différentes zones du bassin versant. Nous pouvons simplement affirmer la prépondérance de l'érosion dans les schistes du Lias. Toutefois, nous pouvons évaluer l'érosion moyenne dans le bassin versant de la Romanche, en nous basant sur la valeur calculée de l'alluvionnement de la retenue du Chambon depuis 45 ans, soit $7 \cdot 10^6$ t, ce qui correspond à une production moyenne de 450 t de sédiments par km^2 et par an, ou encore à une érosion de 0,25 mm par an, en estimant arbitrairement le poids volumique des alluvions à $1,8 \text{ g/cm}^3$. Localement dans les zones schisteuses, cette érosion dépasse certainement le centimètre par an.

En conclusion de cette étude sur l'érosion, nous citerons l'ASCE (1977) : "La solution la plus efficace pour lutter contre la sédimentation serait d'interrompre l'érosion... mais cela n'est pas toujours physiquement possible". Par contre, nous pensons qu'il est possible d'éviter une accentuation des facteurs d'érosion liés au couvert végétal. Accentuer l'implantation des forêts, installer des bandes d'arrêts dans les zones de forte érodabilité, réutiliser ou stabiliser les déblais lors de travaux importants, sont techniquement réalisables.

Enfin, nombreux sont les aménagements qui possèdent en amont des retenues un bassin de décantation où se dépose une partie des sédiments charriés par les rivières.

Nous voyons que techniquement des solutions préventives ou curatives existent vis-à-vis de l'érosion et de la sédimentation. Le coût de ces installations doit être proportionné aux économies réalisées par le ralentissement de la perte de capacité de la retenue.

5.4. - EFFICACITE DES VIDANGES

Les courbes de la figure 5.5. montrent l'influence des vidanges sur les volumes d'alluvions stockés dans la retenue. 50 % des volumes déposés depuis 1935 se trouvent dans les 700 premiers mètres en amont du barrage ; 50 % des volumes évacués lors des vidanges successives proviennent des 900 premiers mètres.

La répartition des sédiments dans la retenue est en relation étroite avec leur granularité et avec l'extension du lac. Etant donné la très faible teneur en argile des alluvions (cf. chap. 3.), il n'y a pas d'accumulation importante juste à l'amont du barrage. Ainsi,

- le comblement à proximité de l'ouvrage étant moindre, l'envasement de la prise d'eau est retardé ;
- le dévasement à proximité de l'ouvrage, grâce aux vidanges, est alors moins efficace dans ce cas que dans celui où les sédiments sont argileux ; un courant beaucoup plus important étant nécessaire pour provoquer le déplacement des sédiments silteux. La vidange sera d'autant plus efficace si elle est réalisée en période de crue, c'est-à-dire lorsque les eaux sont très chargées. Cela est surtout vrai pour la crue de fonte des neiges.

La question peut se poser de savoir si une partie des alluvions entrant dans la retenue ne pourrait pas être éliminée en ouvrant la vanne de fond à un moment propice par rapport au début de la crue.

Pour examiner cette question, il faut souligner que ;

- les sédiments se déposent par des courants qui parcourent le fond de la retenue (courant d'inféroflux). Cela est un fait positif pour l'efficacité du procédé, mais c'est le seul ;
- les sédiments, du fait de leur granulométrie assez grossière, ne s'accumulent qu'en faible quantité au droit du barrage. Par conséquent, les courants de soutirage devraient être élevés pour éviter le dépôt ;
- d'après les études faites par VIVIAN (1979) sur l'aménagement du Sautet le débit solide et le débit liquide montrent une mauvaise corrélation. La charge de l'eau variera pour une crue de même intensité suivant la période de l'année.

- pour éviter une diminution de la capacité utile de la retenue, de tels soutirages ne pourraient être opérés que lorsque la retenue est déversante (août-septembre), donc en dehors de la période de charge maximale de l'eau. Toutefois le mois de septembre montre aussi des pics d'intensité de la charge solide lors des précipitations importantes.

Donc, il semble difficile d'espérer trouver une solution efficace dans la lutte contre l'envasement de la retenue du Chambon en ouvrant la vanne de fond pendant une crue, en particulier du fait de la mauvaise corrélation entre les débits liquides et solides. Toutefois, on peut conseiller d'utiliser ce procédé lorsque la retenue est à sa cote maximale. Au lieu de laisser se déverser la retenue, des volumes équivalents soutirés par la vidange de fond n'entraîneraient qu'une faible quantité de sédiments, mais sans incidence économique vis-à-vis de la perte de potentiel énergétique que constitue une diminution de la capacité utile. L'utilisation régulière de la vidange de fond permettrait d'éviter une sédimentation trop importante et surtout une consolidation trop importante au droit du barrage. Cela éviterait de renouveler l'échec des travaux de 1960 pour dégager l'ancienne prise d'eau.

5.5. - CONCLUSIONS

En guise de conclusion, on peut tenter des prévisions sur la vitesse de comblement de la retenue.

Si l'on considère que $5,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ se sont déposés en 45 ans et si l'on compare ce chiffre aux $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de capacité utile, on constate que le barrage sera entièrement comblé dans environ 420 ans! Si l'on admet un rythme de vidanges identique à celui des 45 premières années d'exploitation, on aboutit à un comblement dans environ 600 ans !

Enfin, si on effectue une vidange totale tous les trois ans, de même ampleur que celle de 1981, on obtient un comblement dans environ 1 600 ans !

Ce chiffre est utopique étant donné qu'on ne peut pas empêcher la sédimentation sur les terrasses. L'essentiel des matériaux vidangés provient du chenal. Il est donc impossible de soutirer la même quantité d'alluvions à chaque vidange, si celles-ci sont rapprochées.

Toutefois, des vidanges fréquentes permettent d'éviter le comblement de la vidange de fond. Pour garantir leur efficacité, il serait nécessaire de déstabiliser artificiellement les terrasses.

Enfin, rappelons que si les vidanges apparaissent comme une solution efficace contre l'envasement des retenues, une étude des nuisances qu'elles provoquent à l'aval reste nécessaire pour pouvoir en dresser le bilan économique.

CHAPITRE VI : PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES ALLUVIONS

6.1. : LES METHODES

6.2. : LES RESULTATS

6.3. : CONCLUSIONS

La vidange de la retenue de la réserve du Chambon en 1981 nous a permis de caractériser les paramètres géotechniques d'alluvions présentant un faciès à lamines.

6.1. - LES METHODES

Les notations et symboles entre crochets sont ceux recommandés par la Société Internationale de Mécanique des Sols lors de son 5e congrès (Paris, 1961).

6.1.1. Les caractéristiques d'identification

6.1.1.1. - teneur en eau

- . La teneur naturelle en eau ($w_{nat.}$) représente le rapport du poids de l'eau au poids de l'échantillon après passage de celui-ci durant 24 h. à l'étuve à 105 °C.
- . La teneur saturante en eau ($w_{sat.}$) représente la teneur en eau de l'échantillon saturé, c'est-à-dire lorsque la totalité des vides est remplie d'eau.
- . L'indice de saturation $[S_r]$ définit le rapport du volume occupé par l'eau au volume total des vides.

6.1.1.2. - Poids volumiques

- . Le poids volumique du sol ou poids volumique apparent $[\gamma]$ définit le rapport du poids de l'échantillon intact à son volume. Nous utiliserons la notation γ_h qui est couramment employée.
- . Le poids volumique sec $[\gamma_a]$ est défini par le rapport du poids de l'échantillon étuvé à 105 °C pendant 24 heures, à son volume initial.

Les échantillons ont été prélevés au carottier de 3,5 cm de diamètre.

. Le poids volumique déjàugé $[\gamma']$: dans des conditions de saturation chaque grain solide est soumis à la poussée d'Archimède. Dans ce cas, on définit le poids volumique déjàugé :

$$\gamma' = \gamma_h - \gamma_w$$

6.1.1.3. - Consistance

6.1.1.3.1. - Les limites d'Atterberg, définies en 1911, elles ont été précisées ensuite par Casagrande.

La limite de liquidité $[w_L]$ sépare l'état liquide de l'état plastique,

La limite de plasticité $[w_p]$ sépare l'état plastique de l'état solide.

Ces paramètres ont été déterminés à partir d'essais réalisés à l'aide d'un "Fall-Cone" (cf. annexe.).

6.1.1.3.2. - Les indices de consistance

Ils se calculent à partir des limites d'ATTERBERG :

$$\text{L'indice de plasticité} \\ [I_p] = w_L - w_p$$

$$\text{L'indice des consistance} \\ [I_c] = \frac{w_L - w_{nat.}}{I_p}$$

Ic	Consistance
0	liquide
0 à 0,25	très molle
0,25 à 0,5	molle
0,5 à 0,75	inconsistante
0,75 à 1	consistante
1	très consistante

L'indice de liquidité $[I_L]$

$$I_L = \frac{w_{\text{nat.}} - w_p}{I_p} = 1 - I_c$$

6.1.2. - Les caractéristiques mécaniques

6.1.2.1. - Le cisaillement

La contrainte de cisaillement en essai non drainé ou cohésion apparente $[C_u]$ a été déterminée à l'aide du "Fall-Cone" (cf. annexe V).

Cet essai permet de déterminer aussi la sensibilité $[St]$. C'est le rapport du C_u de l'échantillon non remanié au C_u de l'échantillon remanié.

6.1.2.2. - La résistance à la pénétration dynamique $[R_p]$

Le phénomène a permis de déterminer outre R_p , l'épaisseur des alluvions en divers points de la retenue.

Nous avons utilisé un pénétromètre dynamique à main BEVAC P2, caractérisé par une masse de 30 kg (M) tombant d'une hauteur de 20 cm sur une enclume. Le système de battage permet d'enfoncer un train de tiges au bout duquel est fixé un cône de 60 ° d'angle au sommet et de 10 cm² de section.

On a calculé la résistance à la pénétration dynamique par la formule (dite des des Hollandais) :

$$R_p = \frac{N}{e} \cdot \frac{M^2 H}{S(M + P)}$$

où N est le nombre de coups

e l'enfoncement

M le poids du mouton

H la hauteur de chute du mouton

S la section du pénétromètre

P le poids de l'enclume et des tiges.

Ne pouvant déterminer la résistance due au frottement latéral sur les tiges, nous avons assimilé la résistance de pointe (R_p) à la résistance totale (R_t).

6.1.2.3. - La compressibilité

Différents coefficients peuvent être calculés à la suite d'essais oedométriques.

Le coefficient de consolidation $[C_v]$

Suivant le mode opératoire du L.C.P.C., nous l'avons calculé par la méthode de la racine carrée (ou de Taylor).

$$C_v = \frac{0,848 h^2/4}{t_{90}}$$

ou t_{90} est le temps nécessaire pour obtenir 90 % de consolidation et h la hauteur de l'échantillon à l'instant t.

Le coefficient de perméabilité $[k]$

L'oedomètre est dans ce cas utilisé comme perméamètre à charge variable.

$$k = 2,3 \frac{s}{S} \frac{h}{t_1 - t_0} \log \frac{h_0}{h_1}$$

des où

- s = diamètre du capillaire
- S = diamètre de l'échantillon
- h = épaisseur de l'échantillon
- h_0 = hauteur initiale de l'eau dans le capillaire
- h_1 = hauteur finale de l'eau dans le capillaire

6.2. - LES RESULTATS

6.2.1. - Les essais d'identification

6.2.1.1. - Teneur en eau

Teneur naturelle en eau :

A la suite des travaux de DE LORY (1960) montrant une forte variation de teneur en eau suivant la granulométrie de lamines successives (fig. 6.1.), nous avons cherché si cette relation existait pour les alluvions du Chambon.

437 mesures de teneurs en eau montrent une grande homogénéité des résultats. En particulier, la variation de la teneur en eau a été étudiée sur toute la hauteur du prélèvement CT1 (252 mesures). La figure 3.9. montre qu'elle est comprise entre 19 % et 54 %, la moyenne se situe autour de 40 %.

Il ne semble pas y avoir de corrélation nette entre la dimension des grains et la teneur en eau. Nous avons vérifié ce fait en reportant sur un diagramme les diamètres moyens en fonction de la teneur en eau et sur un autre les diamètres moyens en fonction de la teneur en argile (fig. 6.2. et 6.3.). L'étude statistique montre une grande dispersion des résultats.

Teneur en eau à saturation, indice de saturation :

Le calcul des teneurs en eau montrent que les alluvions ont un indice de saturation toujours très proche de i_w sat., calculé sur les échantillons sur lesquels y_d et y_h ont été étudiés, a une valeur comprise entre 35 et 48 %.

6.2.1.2. - Poids volumique

La densité a été mesurée exclusivement sur le prélèvement CT7 de 0,40 m à

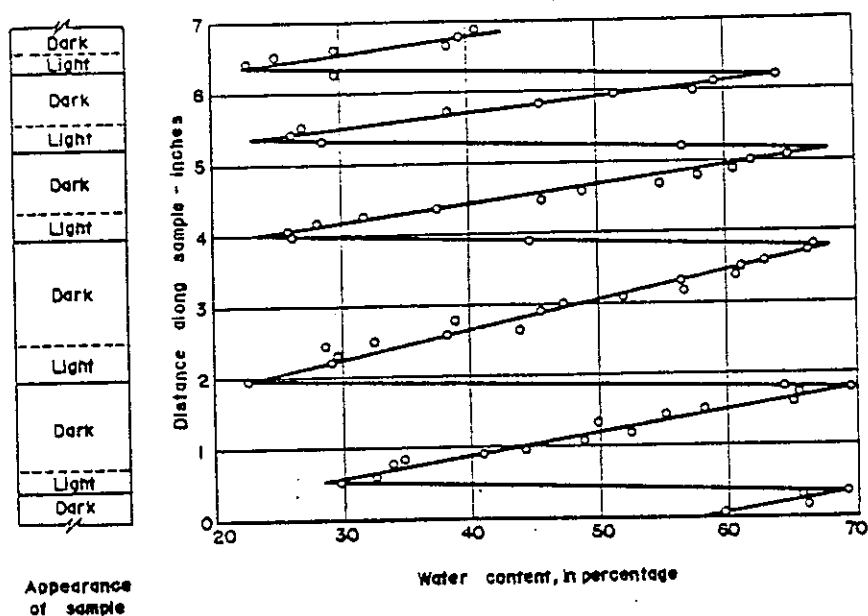


Figure 6.1. - Variation de la teneur en eau dans un échantillon d'argile varvée (DE LÖRY, 1960).

Numéro d'échantillon	F %	WL %	P %	Wp %	Ip %	I _L	I _c	w nat. %	Class. L.C.P.C.
CT7-1-35	54	53	27	28	25	0,67	0,33	45	At
CT7-1-61	51	50	25	26	23	0,85	0,15	47	At
CT7-11-1	58	58	32	33	25	0,36	0,64	42	L
CT7-11-2	50	49	23	24	26	0,83	0,17	45	Ap
CT7-11-7	49	48	25	25	23	0,74	0,26	42	Ap
CT7-11-9	52	51	27	27	23	0,58	0,42	41	At
CT1-155	48	46	24	25	22	0,6	0,40	39	Ap
CB1-16	47	46	26	26	20	0,74	0,26	41	Ap
Moyenne	51	50	26	27	23	0,67	0,33	42,8	At

Tableau 6.1. - Nombre de finesse (F), nombre de plasticité (P), et indices déduits.
Classification correspondante du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

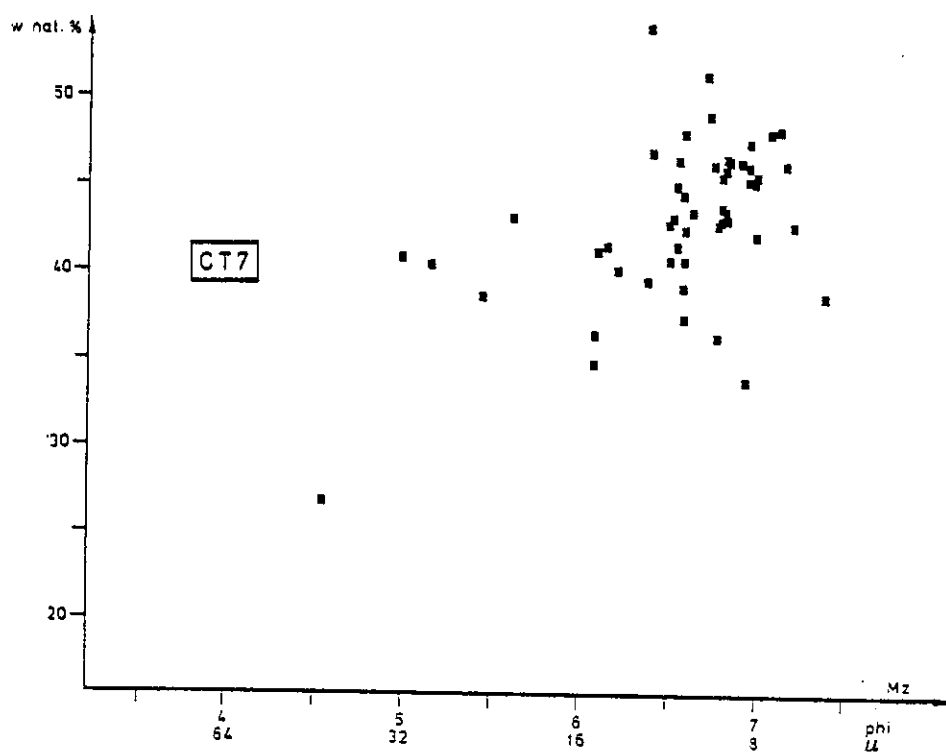


Figure 6.2. : Corrélation entre la teneur en eau et le diamètre moyen du prélèvement CT7.

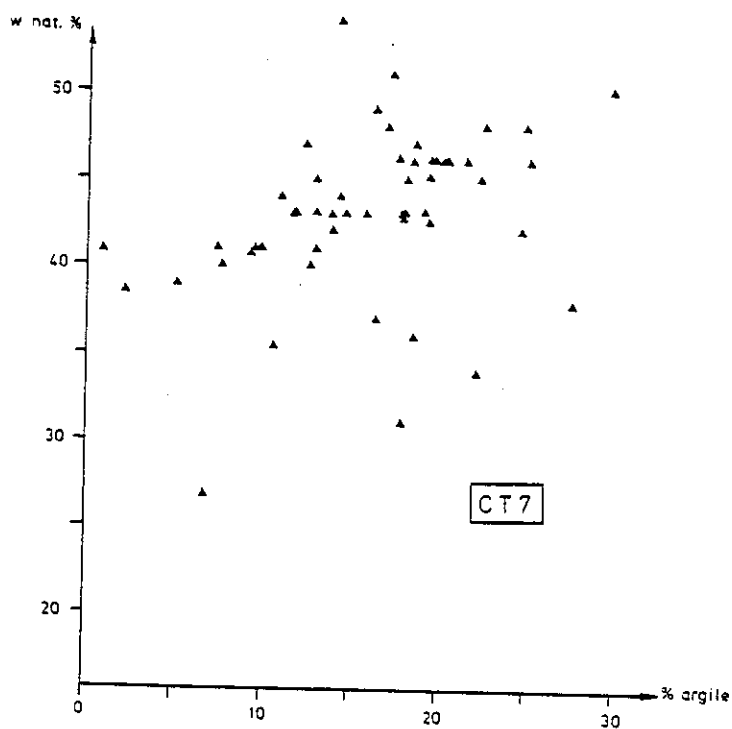


Figure 6.3. : Corrélation entre la teneur en eau et la teneur en argile des échantillons du prélèvement CT7.

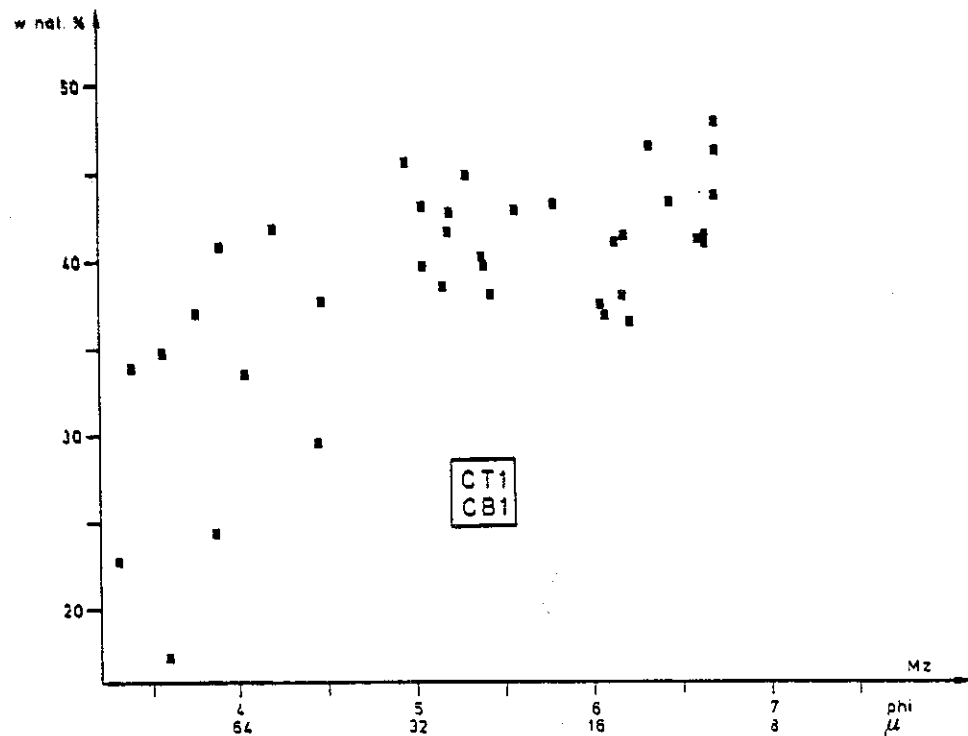


Figure 6.4. : Corrélation entre la teneur en eau et le diamètre moyen des échantillons des prélèvements CT1 et CB1.

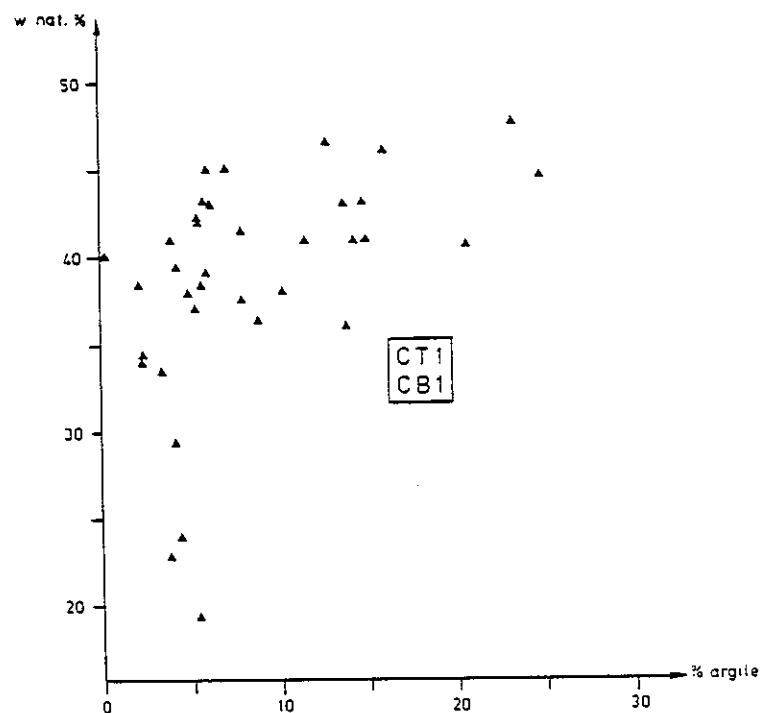


Figure 6.5. : Corrélation entre la teneur en eau et la teneur en argile des échantillons des prélèvements CT1 et CB1.

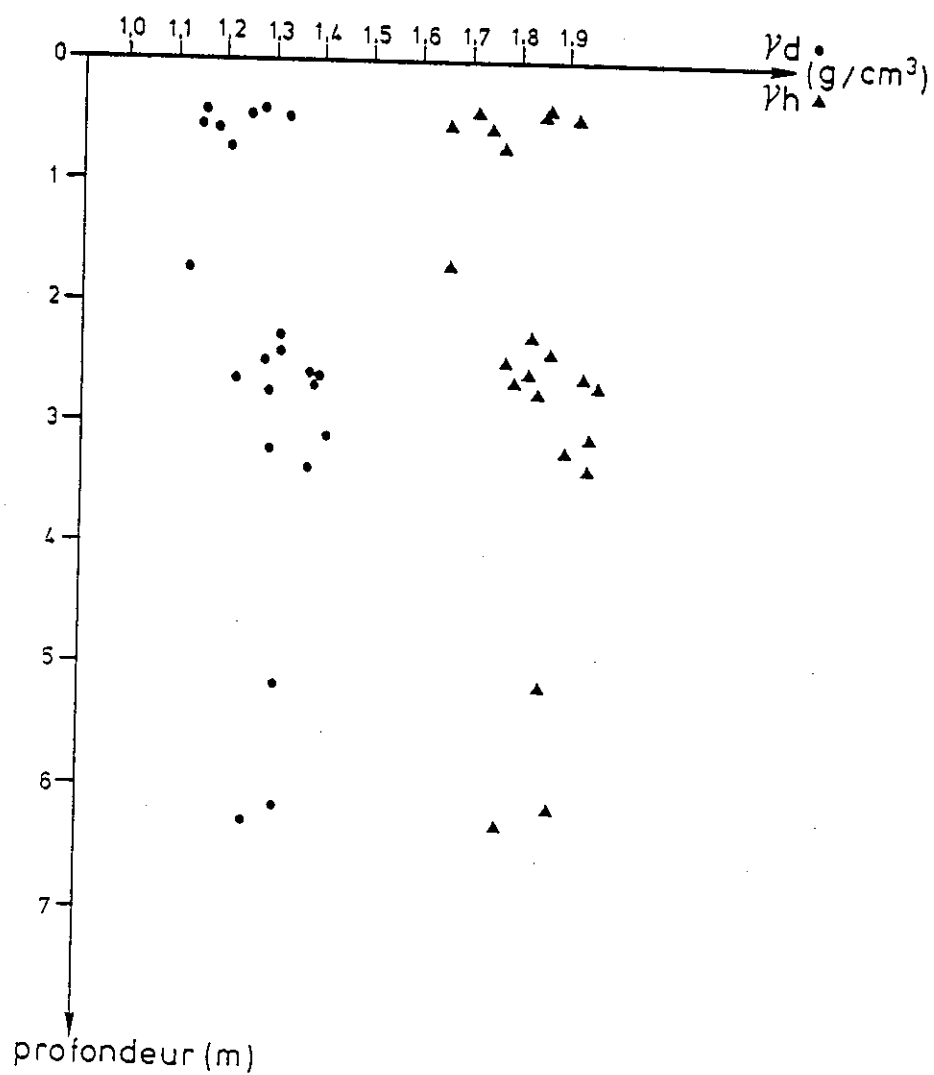


Figure 6.6. : Variation du poids volumique en fonction de la profondeur du prélèvement CT7.

6,30 m de la surface. On obtient un poids volumique sec (γ_d) compris entre 1,12 et 1,42 g/cm³ et un poids volumique apparent (γ_h) compris entre 1,65 et 1,92 g/cm³. Ces valeurs ont été reportées sur un diagramme en fonction de la profondeur (fig. 6.6.). On remarque que γ_d et γ_h n'augmentent pas notablement avec la profondeur.

Le sédiment a donc peu évolué depuis son dépôt.

6.2.1.3. Consistance

Les valeurs des limites d'ATTERBERG permettent de situer les huit échantillons étudiés dans le diagramme de CASAGRANDE (fig. 6.7). Ceux-ci sont constitués d'un silt argileux.

Sept points oscillent entre les argiles peu plastiques et très plastiques. Définissons-les comme moyennement plastiques. Un seul point franchit la ligne A, vers les limons très plastiques.

La consistance des échantillons varie de très molle à molle, sauf pour le CT7-11-2 qui atteint le domaine inconsistant ; la valeur moyenne est de 0,33 (molle). Selon la classification du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, les valeurs moyennes calculées permettent d'attribuer le symbole At (argile très plastique). Toutefois, si on fait abstraction de l'échantillon CT7-11-1, qui s'écarte le plus de la moyenne, on obtient le symbole Ap (argile peu plastique). Il est plus juste de présenter les alluvions du Chambon comme une argile moyennement plastique (terme inexistant dans la classification L.C.P.C.).

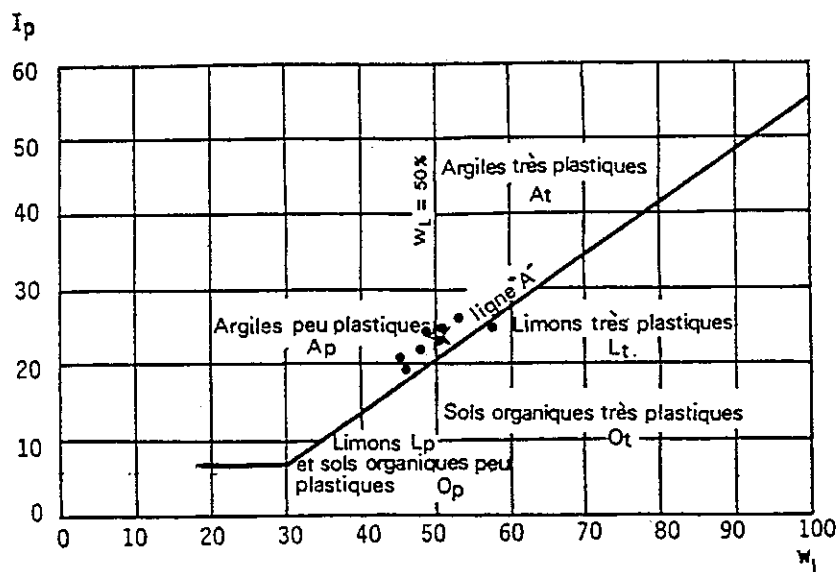


Figure 6.7. :
Situation de 8 échantillons
dans le diagramme de plasti-
cité de CASAGRANDE.

6.2.1.4. - Les essais géophysiques

Deux sondages électriques et deux sondages sismiques ont permis de déterminer l'épaisseur de la couche d'alluvions sur le paléosol, ainsi que des valeurs de résistivités et vitesses sismiques des alluvions.

En sismique, les vitesses étaient de 300 et 340 m/s pour les alluvions et de 1 500 et 1 800 m/s pour le paléosol. La résistivité des alluvions était de 38 et 40 $\Omega.m$; celle du paléosol de 720 et 1 560 $\Omega.m$.

6.2.2. - Les essais mécaniques

6.2.2.1. - Le cisaillement

La cohésion non drainée a été déterminée à l'aide du "Fall-Cone" sur 26 échantillons silto-argileux du prélèvement CT7 et 7 échantillons du prélèvement CT1. Les résultats ont été reportés dans le tableau 6.2. pour les deux prélèvements et dans la figure 6.8. pour le prélèvement CT7.

On obtient :

- pour le prélèvement CT7 :

- . 19 à 70 kPa pour les échantillons intacts,
- . 6 à 19 kPa pour les échantillons remaniés.

En terme de sensibilité, ces résultats donnent des valeurs s'étalant de 1,7 à 6,4 (matériau peu sensible à sensible).

- pour le prélèvement CT1 :

- . 41 à 78 kPa pour les échantillons intacts,
- . 18 à 45 kPa pour les échantillons remaniés ; ce qui fait varier la sensibilité de 1,3 à 4,3 (matériau peu sensible à sensible).

Numéro d'échantillon	Profondeur cm	Cohésion Cu (kPa)		Sensibilité St
		Ech. intact	Ech. remanié	
CT7-1-11	3,75	64	14	4,6
CT7-1-16	7,7	39	19	2,1
CT7-1-18	8,85	39	8	4,9
CT7-1-23	11,35	51	8	6,4
CT7-1-33	14,3	29	12,5	2,3
CT7-1-35	21,5	22,5	8,5	2,6
CT7-1-39	24,4	31,5	8	3,9
CT7-1-48	29,6	47	10	4,7
CT7-1-55	33,4	25	6	4,2
CT7-1-60	40,55	25	15	1,7
CT7-1-60-2	41,55	26,5	14,5	1,8
CT7-1-61	42,65	19	9	2,3
CT7-1-65	45,3	49	11	4,5
CT7-1-71	50,25	20,5	10	2
CT7-1-73	54,65	22,5	9	2,5
CT7-1-81	61,25	39	6,5	6
CT7-1-82	65,20	54	15,5	3,5
CT7-1-83	69,20	70	20,5	3,4
CT7-2-12	155,85	72	14	5,1
CT7-2-13	161,05	65	19	3,4
CT7-2-15	163,8	40	13	3,1
CT7-2-16	167,55	32	14	2,3
CT7-11-1	511,00	36	6,5	5,6
CT7-11-2	518,10	30	10	3
CT7-11-7	612,00	43	11	3,9
CT7-11-9	618,00	70	11,5	6,3
CT1-155	118,6	49	22,5	2,2
CT1-178	157,2	49	19	2,6
CT1-201	171,75	78	18	4,3
CT1-222	185,25	45	18,5	2,9
CT1-229	189,75	60	45	1,3
CT1-240	201,25	41	14	2,9
CT1-251	216,8	88	25	3,5
Moyenne		45	14	3,2

Tableau 6.2. - Cohésion non drainée et sensibilité des échantillons des prélèvements CT7 et CT1.

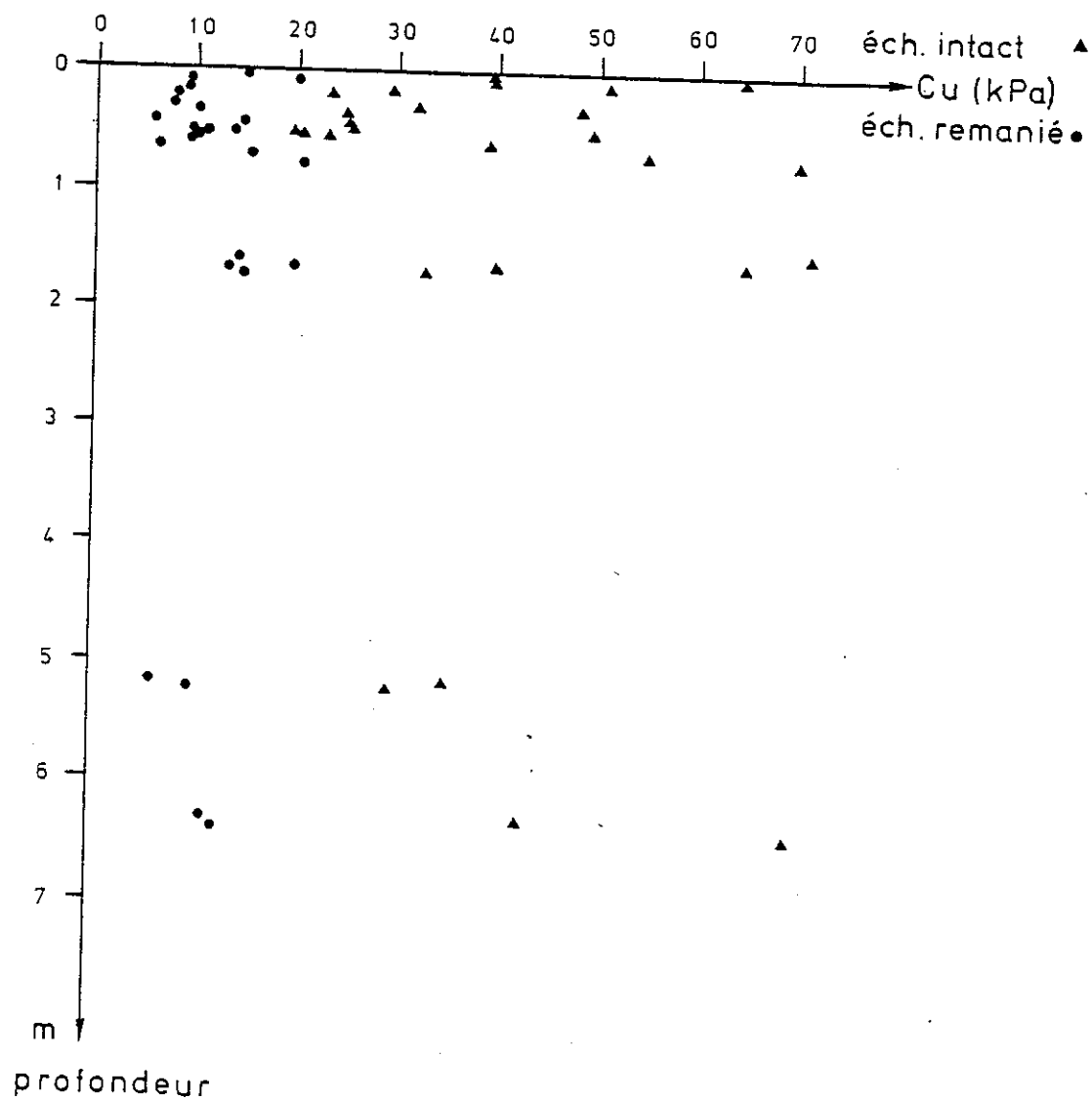


Figure 6.8. : Variation de la cohésion non drainée en fonction de la profondeur du prélèvement CT7.

6.2.2.2. - La résistance à la pénétration dynamique

Compte tenu des forces de frottement contrariant l'enfoncement du pénétromètre, la résistance mesurée doit être assimilée à la résistance totale. La résistance de pointe peut être estimée au début de l'essai, lorsque les forces de frottement sont encore faibles.

Du fait de cette remarque, nous avons obtenu une résistance totale (R_t) variant entre 50 kPa et 1 MPa pour les niveaux silto-argileux. On peut atteindre 7,5 MPa pour les niveaux plus grossiers et plus de 10 MPa pour le paléosol.

La figure 6.9 représente deux essais pénétrométriques. Le P3 montre une courbe assez régulière, ce qui témoigne d'une assez bonne homogénéité de faciès sur la verticale. Par contre, le P5 montre des pics synonymes de niveaux grossiers alternant avec les silts argileux à lamines.

6.2.2.3. - La compressibilité

L'étude du comportement des alluvions lors d'un essai oedométrique montre comment la consolidation se produit et s'il y a lieu d'envisager une évolution dans le temps.

D'autre part, il est toujours intéressant, d'un point de vue expérimental, de connaître l'ensemble des propriétés géotechniques d'un matériau dont les caractéristiques sédimentologiques sont connues.

L'essai oedométrique consiste en la mesure du tassement d'un échantillon frotté latéralement et soumis à des charges croissantes appliquées par paliers de 24 heures. L'échantillon est comprimé entre deux pierres poreuses qui permettent l'expulsion de l'eau.

On est donc relativement éloigné des conditions prévalant in situ. En effet, du fait de leur faciès à lamines et de la présence de niveaux silto-sableux à sableux, les alluvions du Chambon présentent une perméabilité horizontale beaucoup plus importante que la perméabilité verticale (à petite échelle comme à grande échelle). Ce qui fait que dans notre cas, il aurait été intéressant de pouvoir drainer l'échantillon latéralement lors de l'essai.

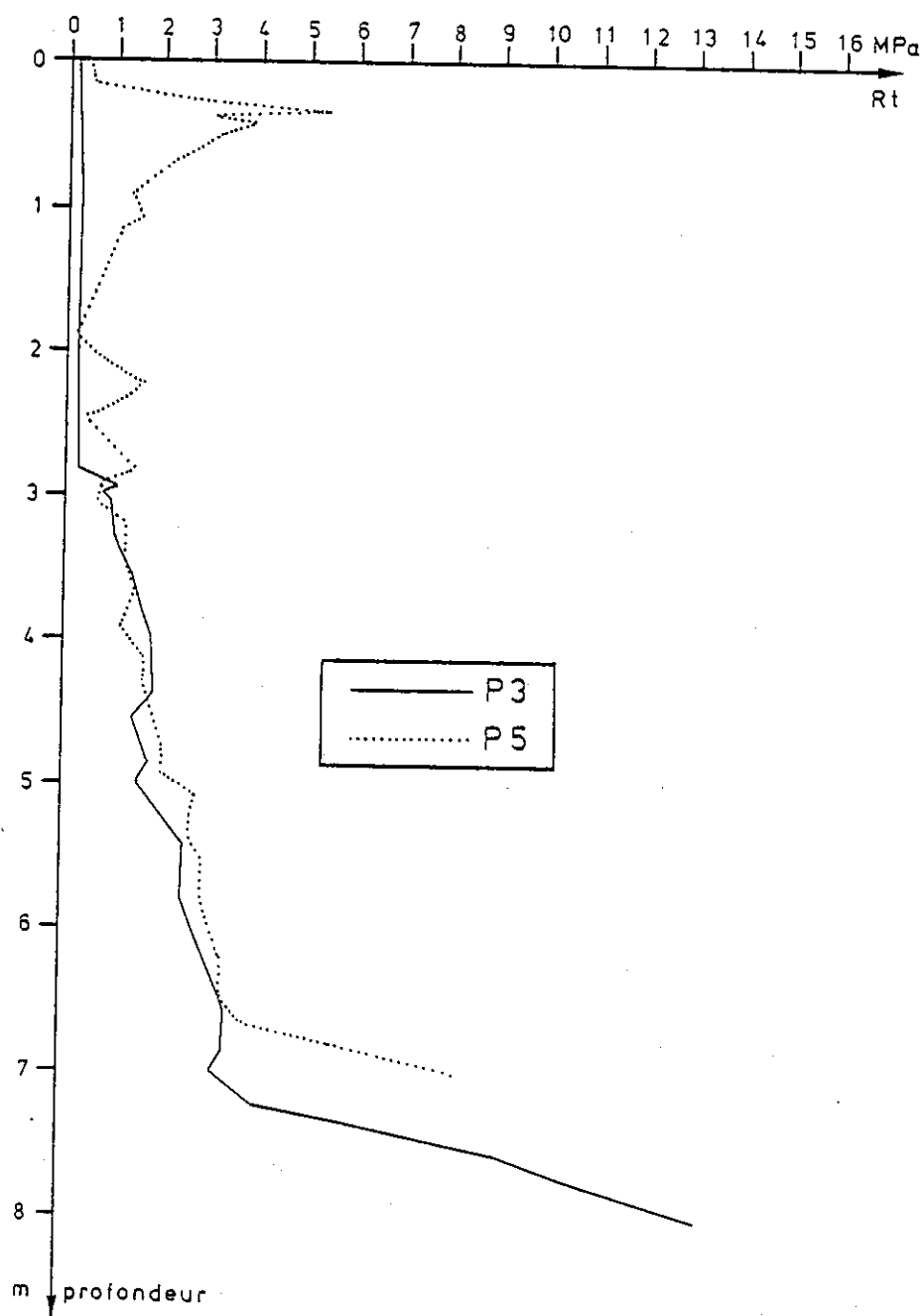


Figure 6.9. : Résultat de deux essais pénétrométriques dynamiques.

Nous présentons ici les résultats de deux essais oedométriques. Le premier a été réalisé à partir d'un fragment de carotte de silt argileux prélevé à 1,20 m de profondeur, en aval du delta du torrent de la Pisse (échantillon CS1-4). Le deuxième essai a été effectué à partir d'une boue homogénéisée du même matériau.

Pressions (kPa)	CS1-4 intact		CS1-4 remanié	
	Coefficient de consolidation (cm ² /s)	Perméabilité (m/s)	Coefficient de consolidation (cm ² /s)	Perméabilité (m/s)
26	2,5 10 ⁻³	4,2 10 ⁻⁶	8,5 10 ⁻³	5,5 10 ⁻⁶
65	8,5 10 ⁻³	2,6 10 ⁻⁶	8,9 10 ⁻³	5,8 10 ⁻⁶
130	2,6 10 ⁻³	2,6 10 ⁻⁶	8,4 10 ⁻³	5,0 10 ⁻⁶
260	6,2 10 ⁻³	1,9 10 ⁻⁶	7,1 10 ⁻³	4,2 10 ⁻⁶
520	1,2 10 ⁻²	2,1 10 ⁻⁶	7,5 10 ⁻³	2,8 10 ⁻⁶
1 040	1,2 10 ⁻²	1,9 10 ⁻⁶	7,9 10 ⁻³	2,2 10 ⁻⁶

Tableau 6.3. - Détermination du coefficient de consolidation et de la perméabilité de l'échantillon CS1 intact puis remanié.

La figure 6.10. montre les courbes de compressibilité obtenues à partir des résultats de ces essais. La courbe de l'échantillon intact a une forme "classique". Au début du chargement, l'échantillon tasse peu, l'indice des vides diminue très lentement. Dès que la charge appliquée correspond à un dépassement de la charge maximale que le sol a subi dans son histoire, la courbe s'infléchit. Cela correspond à un tassement plus important, donc à une diminution de l'indice des vides avec l'augmentation de la charge.

Cependant, la courbe de l'échantillon remanié est très différente. Il faut rappeler que l'échantillon est une boue, ce qui explique le fort indice des vides. La concavité de la courbe montre un tassement relatif important sous une faible charge (jusqu'à une pression d'environ 5 kPa, ce qui correspond à la pression due au piston). Puis le tassement est relativement plus faible pour une nouvelle augmentation de la charge.

La courbe de l'échantillon intact permet de déterminer la pression de consolidation. On obtient une valeur comprise entre 55 et 108 kPa avec une valeur probable de 70 kPa (selon la construction de CASAGRANDE, mode opératoire du L.C.P.C.). Cette valeur est relativement élevée.

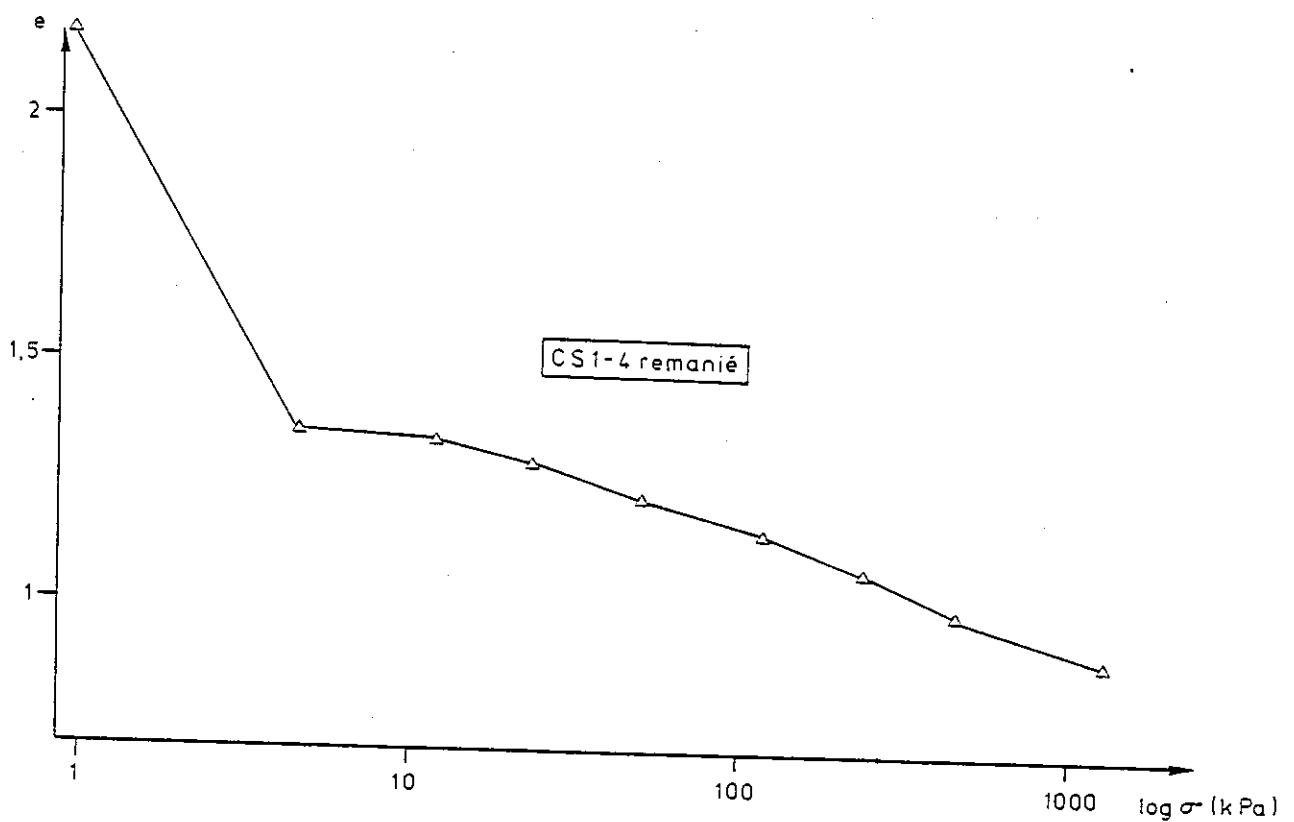
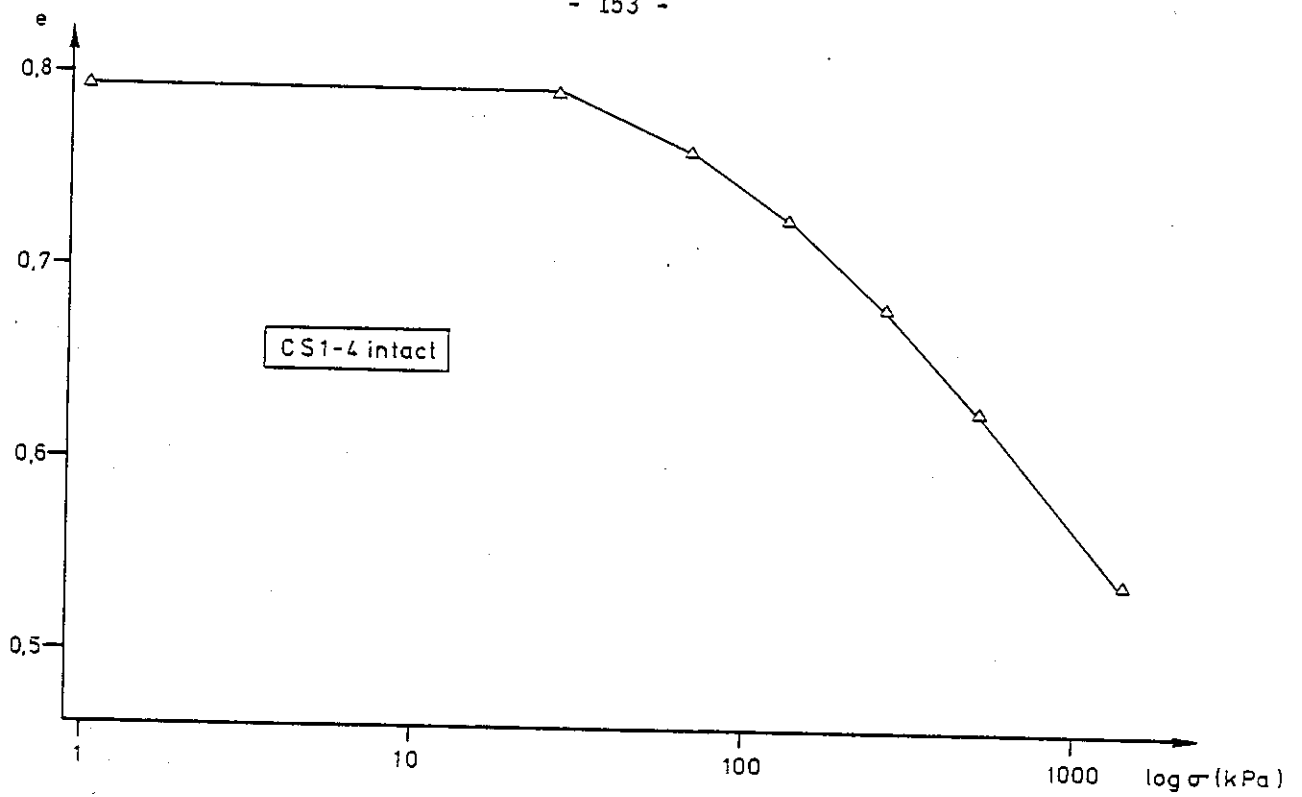


Figure 6.10. : Courbes oedométriques de l'échantillon CS1-4 (intact, puis remanié).

En effet, si l'on considère la contrainte effective (σ') due au poids des sédiments au-dessus de l'échantillon, on obtient une valeur d'environ 10 kPa.

$$\sigma' = \gamma' z = 0,8 \times 1,2 \simeq 1 \text{ t/m}^2 = 10 \text{ kPa}$$

(γ' étant la densité sol déjaugé et z l'épaisseur des sédiments).

La contrainte de préconsolidation est donc 7 fois supérieure à la contrainte effective subie par le sédiment. Pourtant, nous savons que le sol n'a pas subi de préconsolidation, ni de dessiccation. En effet, tous les échantillons prélevés ont montré une teneur naturelle en eau proche de celle de l'échantillon saturé. Une dessiccation, du fait du resserrement des grains, aurait expliqué cette valeur relativement élevée de contrainte de préconsolidation.

Nous ne pouvons que constater que la valeur théorique de contrainte de préconsolidation n'est pas conforme à l'histoire du matériau dans le cas particulier étudié ici.

Les autres paramètres obtenus lors de l'essai oedométrique sont conformes aux valeurs classiquement admises pour des silts argileux (tableau 6.3.).

Pour ce qui est de l'échantillon intact, c_v varie de $1,2 \cdot 10^{-2}$ à $8,5 \cdot 10^{-3}$ (cm^2/s); k de $1,9 \cdot 10^{-6}$ à $4,2 \cdot 10^{-6}$ m/s. En ce qui concerne l'échantillon remanié, c_v varie de $7,1 \cdot 10^{-2}$ à $8,9 \cdot 10^{-3}$ (cm^2/s) et k de $2,2 \cdot 10^{-6}$ à $5,8 \cdot 10^{-6}$.

On constate que les valeurs obtenues sont très voisines pour les deux essais.

6.3. - CONCLUSIONS

La mesure de leurs paramètres d'identification permet d'attribuer aux alluvions silto-argileuses de la retenue du Chambon les caractéristiques suivantes :

- dans les conditions de leur prélèvement, celles-ci sont resté saturées et leur teneur en eau est d'environ 40 %.
- les valeurs moyennes de leurs poids volumiques secs et apparents sont respectivement de 1,3 et 1,8 g/cm^3 .

- les valeurs des limites d'ATTERBERG permettent de leur attribuer le symbole At de la classification L.C.P.C.
- les essais géophysiques révèlent une vitesse sismique d'environ 320 m/s et une résistivité d'environ 40 $\Omega.m$;
- les valeurs moyennes de la cohésion, mesurées sur des échantillons intacts (45 kPa) puis remaniés (14kPa) font apparaître une sensibilité d'environ 3,2 (matériau moyennement sensible) ;
- la résistance à la pénétration dynamique varie d'environ 50 kPa à 1 MPa suivant la présence de niveaux plus grossiers.
- l'étude de la compressibilité montre que ces alluvions acquièrent rapidement un degré de compacité qui, dans les conditions actuelles de dépôt, est définitivement acquis.

En résumé, la confrontation des paramètres géotechniques à diverses profondeurs montre une grande uniformité (poids volumiques, cohésion non drainée). L'absence d'évolution sensible du tassement est à mettre en relation avec la faible teneur en argile de ces sédiments.

CONCLUSIONS GENERALES

En 1981, nous avons réalisé une campagne de prélèvements et d'essais dans la retenue du Chambon afin de caractériser d'un point de vue sédimentologique, minéralogique et géotechnique les matériaux déposés depuis 45 ans.

Cette étude a nécessité 130 analyses granulométriques, 450 analyses minéralogiques par diffractométrie de rayons X, de nombreux prélèvements, divers essais géotechniques (dont 437 mesures de teneur en eau).

Ceci permet de présenter les conclusions suivantes :

1- L'étude des paramètres granulométriques et des figures sédimentaires amène à définir les alluvions du Chambon comme un dépôt mis en place par des courants d'inféoflux (courants de turbidité). Leur périodicité est responsable de la formation de nombreuses lames successives par an, ce qui les distingue des varves. Pour éviter toute confusion, nous proposons de nommer ce dépôt "faciès à lames".

2- L'étude minéralogique des alluvions, comparée à celles des roches du bassin versant, met en évidence l'importance de l'érosion dans les schistes du Lias. Pour ce qui est de la nature des alluvions, les phénomènes d'héritage l'emportent fortement sur la néoformation.

3- L'érosion a abouti à une accumulation totale de $5,4.10^6 \text{ m}^3$ de sédiments dans la retenue dont $1,6.10^6 \text{ m}^3$ ont été évacués lors des turbinages et vidanges depuis la première mise en eau en 1935. Nous constatons que si le rythme de l'alluvionnement est maintenu, le comblement total de la retenue n'interviendra que dans plusieurs centaines d'années.

4- Sur le plan pratique, il est possible d'éviter l'envasement de la vidange de fond. Deux moyens de lutte sont envisageables :

- des vidanges totales régulières. Celles-ci peuvent être de courte durée car les sédiments déposés immédiatement au contact de la vidange de fond seront les premiers évacués.
- des vidanges compensant les volumes habituellement déversés lors des crues. Celles-ci entraîneraient peu de sédiments, mais n'auraient aucune incidence économique car ne provoqueraient pas de diminution de la capacité utile de la retenue.

Pour améliorer le rendement d'une viilage totale de longue durée, il serait souhaitable de procéder à la destabilisation des terrasses alluviales.

5- L'étude géotechnique a permis de quantifier les divers paramètres d'identification et de mécanique des alluvions.

Ainsi, nous avons montré que le matériau atteint rapidement après son dépôt, des caractéristiques géotechniques qui n'évolueront pas de manière sensible avec le temps. De ce fait, nous n'avons pas pu mettre en évidence des phénomènes de tassement des terrasses alluviales.

ANNEXES

- I Techniques de prélèvements
- II Etude comparative de deux techniques d'analyse granulométrique des particules inférieures à 63 microns
- III L'analyse semi-quantitative des minéraux par diffraction x
- IV Détermination de la composition approchée des chlorites
- V Le "Fall-cone"

A N N E X E I

PRESENTATION DES TECHNIQUES DE PRELEVEMENTS

Lors de la vidange de 1981, la Romanche et le torrent de la Pisse ont découpé des falaises dans la masse du dépôt lacustre. Les prélèvements ont été adaptés à cette morphologie particulière.

- La majorité des prélèvements sur les falaises ont été réalisés à l'aide de demi-tubes en P.V.C. de 13 cm de diamètre et de 1 m de long. Deux techniques de prélèvements ont été ainsi utilisées :
 - soit le tube était enfoncé depuis la surface, en bordure de la terrasse alluviale ;
 - soit le sédiment était découpé à l'aide d'une spatule puis déposé dans le tube.
- Pour obtenir une plus grande quantité de matériaux pour les analyses sédimentologiques, des blocs de 50 cm de côté ont aussi été découpés en bordure de terrasses.
- Une troisième technique de prélèvement a été mise en oeuvre.

Nous disposions d'un système de carottage réalisé à l'I.R.I.G.M.. Celui-ci était constitué par une trousse coupante renfermant un tube en P.V.C. de 7 cm de diamètre sur 30 cm de long. Le carottier était solidarisé à des tiges de 1 cm de long. L'enfoncement était assuré par un système de battage identique à celui du pénétromètre (chocs répétés d'une masse de 30 kg tombant sur une enclume d'une hauteur de 20 cm).

Les carottes obtenues étaient pratiquement intactes. Seul un très faible remaniement limité à la périphérie a été constaté.

Pour assurer l'étanchéité et éviter le remaniement pendant le transport, les prélèvements étaient entourés d'un plastique et scellés par un adhésif. L'étanchéité fut excellente puisque les teneurs en eau mesurées peu de temps après le prélèvement ou un an après n'ont pas montré de différences.

A N N E X E II

ETUDE COMPARATIVE DE DEUX TECHNIQUES D'ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES PARTICULES INFÉRIEURES A 63 MICRONS (DENSIMÉTRIE ET COULTER ANALYSER*)

Cinq échantillons ont été étudiés. Les quantités de matériau disponible variaient de 70 à 325 g. L'étude densimétrique, réalisée à l'Institut Dolomieu, nécessitait un tamisage préalable à 40 μ .

Les courbes cumulatives obtenues montrent des différences importantes (fig. II.1), ainsi que le reflète le tableau II.1. (les colonnes 1 correspondent à la densimétrie, les colonnes 2 à celle au Coulter Analyser).

Numéro d'échantillon	Médiane		Moyenne		Déviation standard		Assymétrie	
	(Me)		(Mz)		(σ_1)		(Sk_1)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
C 25	6,5	5,8	7,05	5,9	2,1	1,3	0,22	0,17
C 21 - 8	6,75	6,2	6,8	6,4	2,3	1,8	-0,06	0,004
CT 7 - 1 - 67	7,4	6,6	7,5	6,8	1,8	1,3	0,005	0,32
CT 7 - 1 - 39	7	6,25	7,2	6,7	1,96	1,95	0,15	0,35
CT 7 - 1 - 62	7,45	6,5	7,4	6,7	2,02	1,4	-0,02	0,27

Tableau II.1 : Etude comparative des paramètres des courbes granulométriques obtenues par la densimétrie (1) et le Coulter Analyser (2)

On constate que dans la série 1 la médiane, la moyenne et la déviation standard sont systématiquement plus élevées que dans la série 2. Le classement apparaît donc moins bon pour les échantillons de la série 1.

* Le principe du Coulter Analyser est exposé au paragraphe 3.2.1.1.

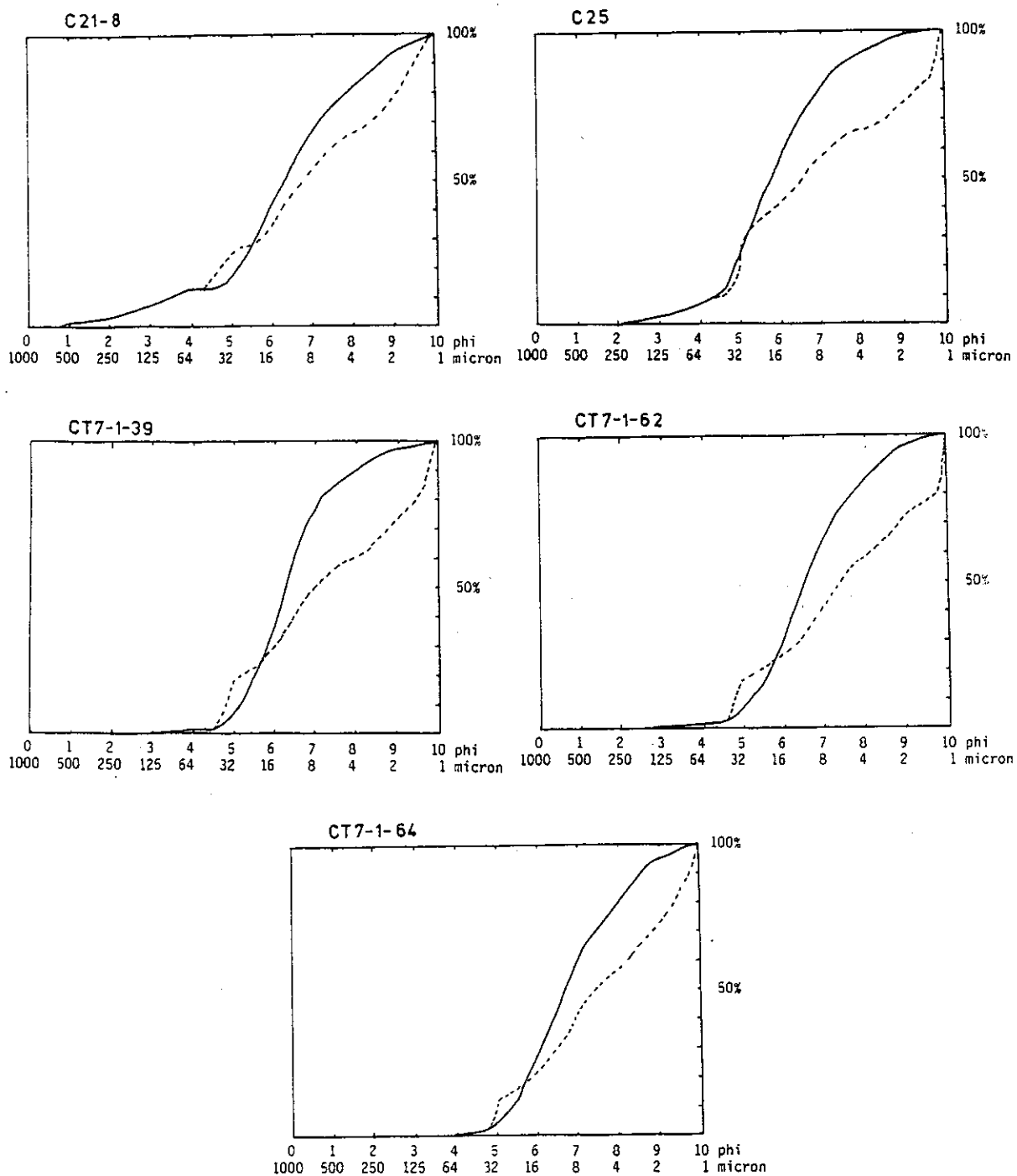


Figure II.1. : Courbes granulométriques cumulatives en ordonnée arithmétique d'échantillons étudiés par densimétrie (pointillé) et au Coulter-Analyser (trait plein).

Le diagramme de PASSEGA montre que les échantillons de la série (1) présentent tous une déviation identique par rapport à ceux de la série (2) (fig. II.2). D'un point de vue interprétation, les échantillons analysés au Coulter correspondent à des dépôts de plus forte énergie que ceux analysés par densimétrie. Cela est dû à un déplacement systématique des courbes de la série (1) vers les particules fines.

Il faut rechercher les causes de ces différences dans la préparation des échantillons et la forme des particules. La mise en suspension de l'argile nécessite l'utilisation d'un défloculant et une agitation mécanique ou ultrasonique. Suivant le produit utilisé, le mode d'agitation et sa durée, on observe des variations dans les teneurs des différentes classes granulométriques. Une agitation trop importante peut provoquer une fragmentation des particules.

D'autre part, du fait qu'au Coulter, le diamètre moyen est calculé par analogie du volume des particules avec celui d'une sphère, on aura, dans le cas de particules allongées, une erreur systématique montrant un diamètre moyen inférieur au diamètre moyen réel.

En ce qui concerne la densimétrie, son principe est basé sur la vitesse de chute des particules sphériques selon la loi de Stokes. Une particule allongée sera plus freinée dans sa chute qu'une particule sphérique de volume identique. Cette méthode entraîne donc elle aussi un déplacement des courbes vers les particules fines.

Lorsqu'on compare les courbes obtenues par ces deux méthodes, on constate que la déviation vers les particules fines est beaucoup plus importante par la densimétrie.

Notre propos n'est pas de prendre position pour l'une ou l'autre des méthodes sédimentologiques. Notre critère de choix était basé principalement sur la rapidité d'exécution et le traitement des données.

Nous voulons par cet exemple d'étude comparative montrer qu'il est indispensable de présenter la technique utilisée lorsqu'on veut discuter des résultats. D'autre part, il serait hasardeux de comparer des courbes granulométriques et leurs paramètres si les analyses n'ont pas été réalisées dans les mêmes conditions.

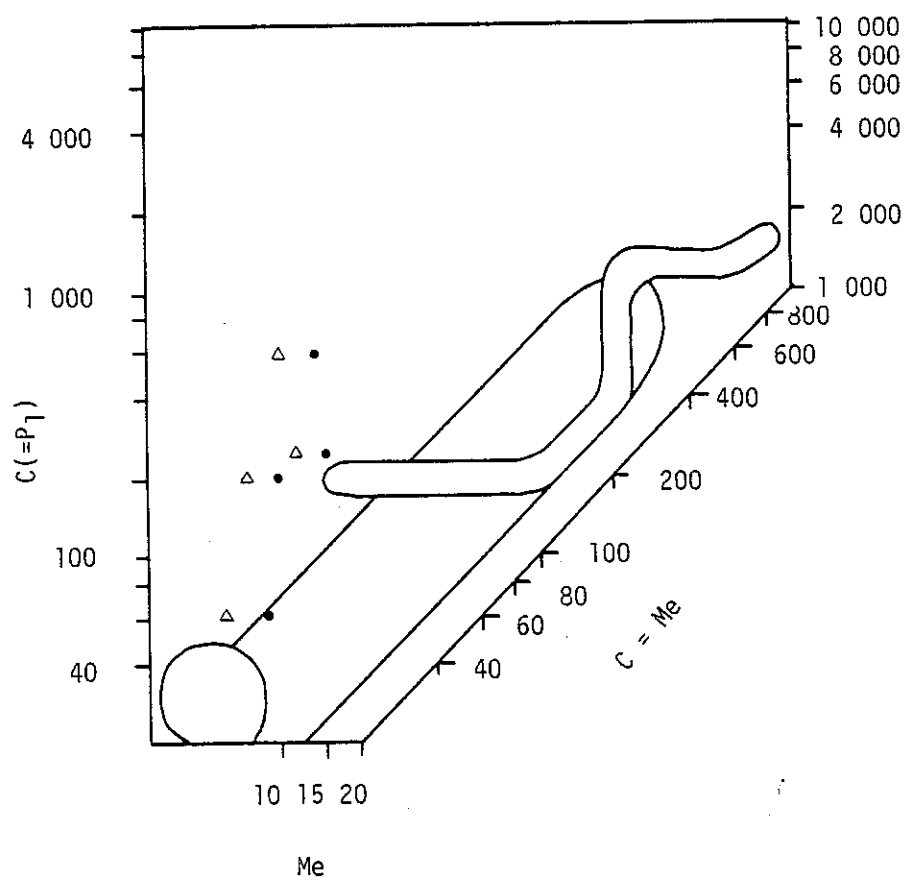


Figure II.2. : Situation des échantillons dans le diagramme de PASSEGA.

A N N E X E III

L'ANALYSE SEMI-QUANTITATIVE DES MINÉRAUX PAR DIFFRACTION X

III.1. PRINCIPES DE L'ANALYSE

L'équation de base est due à BRINDLEY (1961) :

$$C = \frac{I}{I_{mp}} \times \frac{\mu_{ech}}{\mu} \quad (1)$$

où :

- C = teneur du minéral dans le mélange
- I = intensité d'un pic du minéral dans le mélange
- I_{mp} = intensité du même pic du même minéral étudié hors du mélange (étalon externe)
- μ_{ech} = coefficient d'absorption massique de l'échantillon
- μ = coefficient d'absorption massique du minéral étudié.

Quatre difficultés apparaissent :

- la mesure de l'étalon externe (I_{mp})
- la granulométrie
- la tendance des phyllosilicates à se disposer selon des orientations préférentielles
- la détermination du quotient μ_{ech}/μ , représentant "l'effet de matrice".

- La mesure de l'étalon externe

Il faudrait pour chaque série de mesures s'étalonner à partir du diffractogramme d'un minéral pur, par exemple le quartz.

- La granulométrie

Elle intervient dans l'intensité relative entre les pics. Un déplacement vers les granulométries inférieures à 2 microns ou vers les granulométries supérieures à 30 microns fait diminuer le pourcentage relatif du quartz, en particulier par rapport à la calcite (TATLOCK, 1966). C'est entre 5 et 20 microns que le quartz et la calcite

montrent des intensités relatives de leurs pics les plus satisfaisants (fig. III.1).

- L'orientation préférentielle

Elle est surtout importante pour les phyllosilicates. De par leur structure, les phyllosilicates ont une tendance naturelle à s'empiler en feuillets. Il serait donc illusoire d'espérer obtenir la même orientation entre un étalon externe et le minéral dans l'échantillon.

- L'effet de matrice

Dans l'équation (1), le rapport μ_{ech}/μ représente "l'effet de matrice".

$$\mu_{ech} = C_1 \mu_1 + C_2 \mu_2 + \dots + C_n \mu_n$$

où $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ sont les coefficients d'absorption massique des minéraux et C_1, C_2, \dots, C_n leurs teneurs.

Les coefficients d'absorption massique se calculent à partir de la composition chimique (BRINDLEY, 1961).

On ne peut pas calculer directement μ_{ech} par la formule précédente, puisqu'il faudrait connaître les teneurs cherchées.

Pour les minéraux pris isolément en tant qu'étalon externe $\mu_{ech} = \mu$

$$\text{Dans ce cas } C = \frac{I}{I_{mp}}$$

On peut donc calculer μ_{ech} provisoire :

$$\mu'_{ech} = (I/I_{mp})_1 \mu_1 + (I/I_{mp})_2 \mu_2 + \dots + (I/I_{mp})_n \mu_n$$

d'où des teneurs provisoires C' pour chacun des minéraux de la poudre.

$$C' = \frac{I}{I_{mp}} \frac{\mu_{ech}}{\mu}$$

Si le total des C' est différent de 100, ce qui est le cas général, un calcul de pourcentage permettra d'obtenir les teneurs vraies de chacun des minéraux.

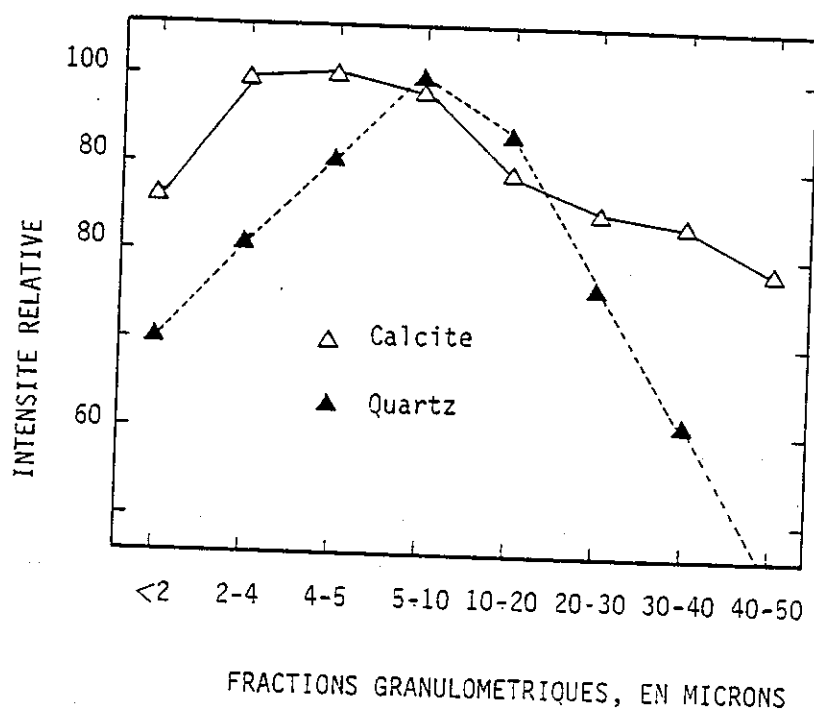


Figure III.1: Intensités relatives moyennes de diverses fractions granulométriques de calcite mesurées à $3,03 \cdot 10^{-1} \text{ nm}$ et de quartz à $3,34 \cdot 10^{-1} \text{ nm}$. (d'après TATLOCK, 1966).

III.2. METHODE DE CALCUL DES TENEURS

Ce principe étant utilisé pour une poudre contenant certains minéraux (chlorite, illite, quartz, feldspath potassique, dolomite), on aboutit à l'établissement de coefficients pour chacun d'eux.

Ces coefficients s'appliquent à des raies déterminées (tableau III.1). Après avoir multiplié la hauteur de la raie par son coefficient, un calcul de pourcentage donne la teneur de chacun des minéraux dans la poudre. Une teneur minimale est nécessaire à l'identification des minéraux (CARROL, 1970).

III.3. CHOIX DES RAIES DE REFLECTION

Chacun des minéraux possède plusieurs raies de réflexion qui correspondent à sa forme cristallographique. Il convient d'expliquer les critères de choix de la raie utilisée lors de l'analyse semi-quantitative.

- Le quartz

La raie 3.34 est la plus communément employée, du fait de son intensité (environ 5 fois plus que la 4.26). TATLOCK (1966) conseille d'utiliser la raie 4.26 car on ne risque pas d'y trouver des superpositions d'autres raies, contrairement à la 3.34 qui coïncide presque avec celles de certains micas durs ou de la sillimanite. La seule interférence pouvant intervenir au niveau de la raie 4.26 est celle d'un feldspath à 4.25, mais il faut pour cela au minimum un pourcentage de 40 % de feldspath dans la poudre.

En ce qui concerne nos analyses, le choix de la raie 3.34 est justifié du fait de l'absence de micas durs et de sillimanite.

- La chlorite

CARROL (1970) et d'autres auteurs conseillent de mesurer le pic de la chlorite à 14.10^{-1} nm préférentiellement au 7.10^{-1} nm, afin d'éviter la confusion avec la kaolinite dont le pic se superpose à celui de 7.10^{-1} nm de la chlorite. Toutefois, suivant que la chlorite est fortement ferrifère ou fortement magnésienne, le rapport entre les deux pics peut être considérablement modifié. Le pic à 14.10^{-1} nm peut même être trop faible pour être mesuré. Il se peut que, dans certains cas, il soit préférable de choisir le pic à 7.10^{-1} nm ou la somme moyenne arithmétique des deux pics afin de se rapprocher de la teneur réelle.

En ce qui concerne nos analyses, le deuxième type de calcul fait environ doubler la teneur apparente en chlorite.

Il est donc nécessaire de connaître la composition chimique de la chlorite dans le mélange.

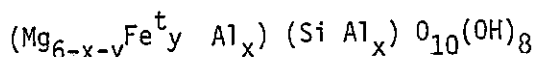
Minéral	Teneur minimale identi- fiable %	Imp Intensité du pic	(hkl)	Coeff. d'absorp- tion massique	Raie utilisée pour l'analyse 1/2 quan- titative (10 ⁻¹ nm)	Coeff. de multipli- cation
Chlorite Mg	1	14	(001)	≈ 100	14,1-14,2	100 ?
Illite	5	14	(001)	≈ 100	10	100
Chlorite Fe	10	14	(001)	≈ 100	14,1-14,2	100 ?
Quartz	1	100	(101)	35	3,34	14
Feldspaths potassiques	5	30	(040) (202)	49	3,25-3,28	50
Plagio- clases	5	45	(002) (040)	34	3,17-3,18	30
Calcite	5	70	(104)	94	3,03	20
Dolomite	1	60	(104)	50	2,88-2,89	24

Tableau III.1 : Identification semi-quantitative par diffraction X de minéraux d'une poudre non orientée. (Teneur minimale identifiable d'après CARROL, 1970).

ANNEXE IV - DETERMINATION DE LA COMPOSITION APPROCHEE DES CHLORITES

La détermination de la composition approchée des chlorites au moyen des rayons X a été réalisée selon la méthode exposée par AUMAITRE et BUFFET (1973).

La composition des chlorites peut s'exprimer par la formule :



2 inconnues sont donc à déterminer (x et y).

- Détermination de la teneur en Al tétraédral (x) :

La méthode proposée par AUMAITRE est celle de BRINDLEY (1961). Elle se base sur la mesure de l'espacement basal d (001), selon l'équation :

$$d(001) = 14,55 \cdot 10^{-1} \text{ nm} - 0,29 x$$

La valeur de d (001) est celle correspondant à la moyenne des valeurs d (001) obtenues pour chaque ordre de réflexion :

$$d(001) \times l = d(001).$$

- Détermination de la teneur en Fe, Mn octaédrique (y) :

AUMAITRE propose d'utiliser la procédure de PETRUK (1964) à partir du calcul du rapport $\frac{I_i(002) + I_i(004)}{I_i(003)}$

$$\frac{I_i(002) + I_i(004)}{I_i(003)}$$

"Comme Fe est généralement le principal atome lourd des chlorites, cette approche fournit une bonne approximation de la teneur en fer des chlorites".

Cette méthode est intéressante, car les raies étudiées de la chlorite n'interfèrent pas les raies des autres minéraux en présence dans la poudre.

Il est mesuré en multipliant la hauteur du pic par la largeur à mi-hauteur.

Un abaque (fig.IV.I.) permet d'obtenir la valeur de $y = \text{Fe}^t \approx \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}^{2+} + \text{Cr}^{3+} + \text{Fe}^{3+}$ à partir de celle du rapport.

- Classification : Le report dans le tableau de HEY (1954) permet d'obtenir le nom de la chlorite étudiée. (fig.IV.2.)

$$\frac{li(002)+li(004)}{li(003)}$$

- 173 -

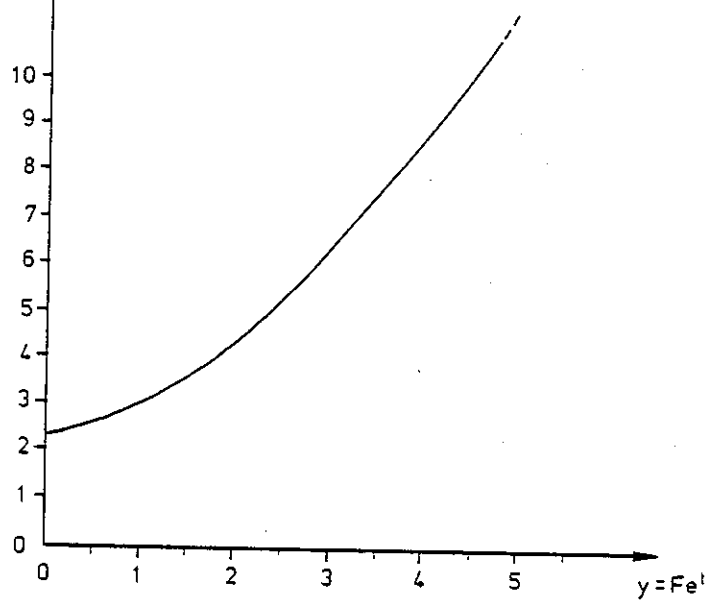


Figure IV.1. - Abaque de PETRUK (1964) pour la détermination des chlorites.

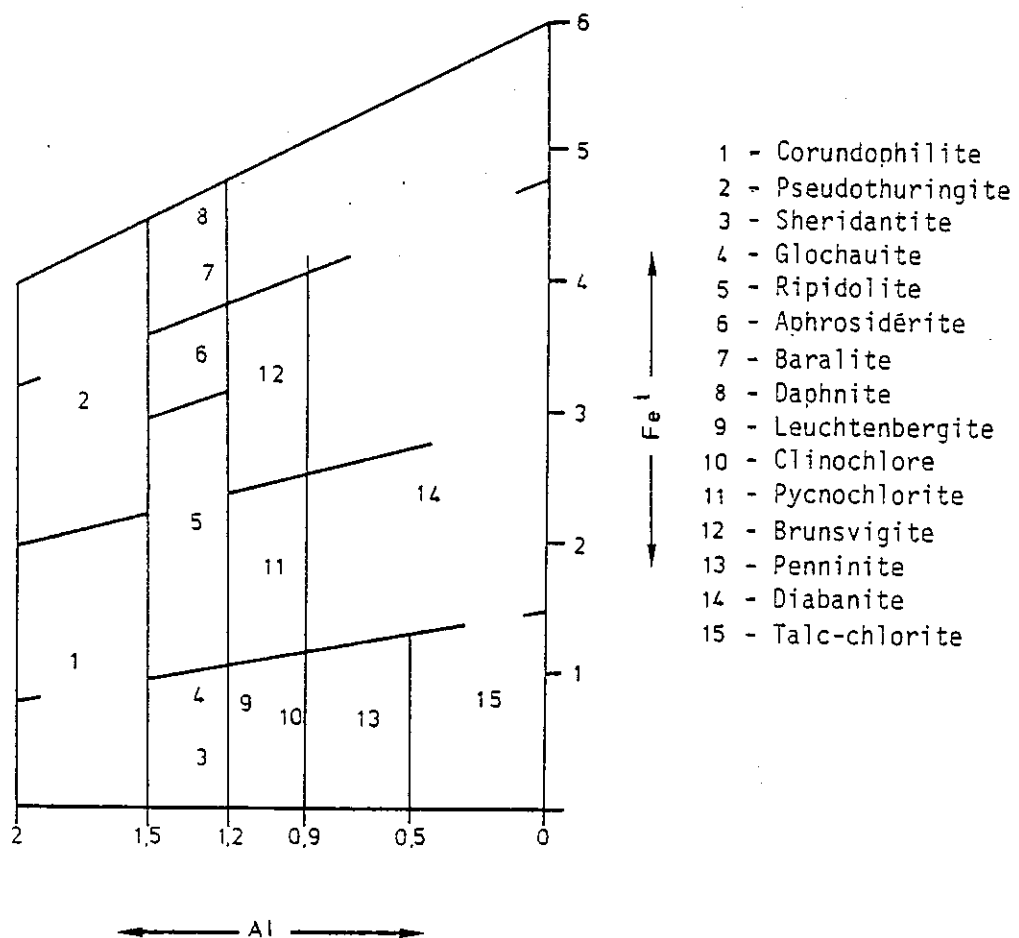


Figure IV.1. - Classification des chlorites.
selon HEY (1954)

-Exemple de calcul de la composition d'une chlorite à partir du diffractogramme de l'échantillon CT4-1-1.

1 - Mesures

001	d(001)	d(001)= d(001)x1	h hauteur	largeur à $\frac{h}{2}$	Ii h x l x 100
			(cm)	(cm)	
001	14,18	14,18			
002	7,08	14,16	11,85	0,27	319,9
003	4,71	14,13	4,3	0,32	137,6
004	3,53	14,12	9,7	0,26	252,2
		56,59	total d (001)		
		14,147	moyenne d (001)		

2 - Calcul de l'Al

$$x = \frac{14,55 - d(001)}{0,29} ; x = \frac{14,55 - 14,147}{0,29}$$

$$x = 1,39$$

3 - Calcul du nombre d'atomes lourds :

$$y = Fe^t \quad Fe^{2+} + Fe^{3+} + (Mn^{2+} + Cr^{3+})$$

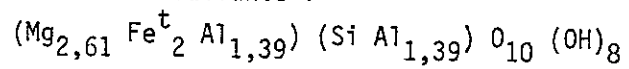
$$\frac{Ii (002) + Ii (004)}{Ii (003)} = \frac{319,9 + 252,2}{137,6} = 4,25$$

L'abaque de PETRUK (fig.IV.1.) modifié par AUMAITRE et BUFFET (1973) à partir de données complémentaires, donne :

$$y = 2$$

4 - Nomenclature :

Obtient la formule suivante :



Le report dans le tableau de HEY des valeurs de Fe^{t} et Al donne le nom de la chlorite : Ripidolite

A N N E X E V

LE "FALL-CONE"

De nombreuses études ont été réalisées, sur les possibilités qu'offrait le "fall-cone" dans l'étude des paramètres d'identification des sols.

Plusieurs auteurs ont essayé de répondre à la question de savoir s'il est opportun de substituer, comme alternative à la méthode traditionnelle, la méthode du "fall-cone" pour déterminer les limites d'Atterberg.

Par ailleurs, cet appareil est utilisé depuis de nombreuses années pour étudier la résistance au cisaillement non drainé (C_u) de l'argile. Le "fall-cone" a été étudié pour la première fois par la Commission Géotechnique des Chemins de Fer Suédois entre 1914 et 1922 (1922). Depuis, cet appareil est largement utilisé dans de nombreux pays. Il semble que la majorité des laboratoires français restent fidèles à la méthode traditionnelle (coupe de Casagrande et rouleau de 3mm).

.1. - DESCRIPTION ET PRINCIPE

Un cône métallique d'un certain poids et d'un certain angle est suspendu au-dessus d'un échantillon de sol. La pointe du cône affleure la surface de l'échantillon.

On laisse tomber le cône sur l'échantillon. La profondeur d'enfoncement est mesurée. Celle-ci dépend de la cohésion (C_u). Des tables donnent la valeur de C_u en fonction de l'enfoncement et du cône utilisé. Si on désire calculer la sensibilité, un deuxième essai doit être effectué sur échantillon remanié.

Les cônes livrés avec l'appareil commercialisé par GEONOR (Oslo, Norvège) ont les caractéristiques suivantes :

Masse (kg)	Angle au sommet
0,400	30°
0,100	30°
0,080	30°
0,060	60°
0,010	60°

5.2. - NOMBRE DE RESISTANCE :

La commission Géotechnique des Chemins de Fer Suédois a introduit la notion de "nombre de résistance". La résistance pour un enfoncement constant du cône est directement proportionnelle au poids du cône. Le cône de 0,060 kg, 60° a été choisi comme cône standard. Une profondeur d'enfoncement de 10 mm avec ce cône standard donne le nombre de résistance 10.

Le rapport H_3/H_1 mesure la sensibilité du sol (KARLSSON, 1961). H_1 représente la résistance d'un sol remanié et H_3 celle d'un sol intact.

5.3. - NOMBRE DE FINESSE, LIMITE DE LIQUIDITE, LIMITE DE PLASTICITE

LEFLAIVE (1971) cite deux inconvénients majeurs lors de la détermination de la limite de liquidité à l'aide de la coupelle de Casagrande.

Le premier est la dispersion des résultats tenant à la sensibilité de l'essai à de faibles différences pouvant exister entre les appareils de mesure (réglage imparfait, usure, inégalité de dureté entre les bases, etc...) et à la sensibilité de l'essai aux différences de techniques opératoire pouvant exister entre opérateurs différents.

Le deuxième inconvénient tient au fait qu'il s'agit d'un essai de cisaillement dynamique, la déformation du sol se faisant sous l'effet de chocs. LEFLAIVE cite CASAGRANDE : "C'est un sérieux désavantage car cela ne fournit pas une base commune de comparaison pour les sols fins dont les réactions sont différentes lorsqu'ils sont soumis à un essai de secousse (dilatance). Un essai simple de cisaillement direct ou de cisaillement indirect, par exemple un essai de pénétration statique ou un essai utilisant le principe d'extrusion de Jürgenson, éliminerait de nombreuses difficultés rencontrées dans l'emploi de l'appareil de limite de liquidité." (CASAGRANDE, 1958).

Diverses études ont eu pour but de déterminer quel était le mode opératoire pour la détermination de la limite de liquidité qui donnait la plus faible dispersion des résultats.

La procédure d'interprétation proposée par le L.C.P.C. en 1966 utilisait un diagramme logarithmique : en abscisse, le logarithme de la teneur en eau $w\%$; en ordonnée, le logarithme de Q/h^2 , Q étant le poids du cône (80 g) et h la pénétration en cm. LEFLAIVE propose de considérer la limite de liquidité comme la teneur en eau correspondant à un enfoncement donné du cône, choisie une fois pour toutes ;

Ce changement de définition est également proposé dans le rapport du Road Research Laboratory (SHERWOOD P.T. ; RILEY D.M., 1968).

En utilisant un cône de 80 g et de 30° d'angle au sommet, le L.C.P.C. remarque que la valeur d'enfoncement de 17 mm est celle qui se rapproche le plus de l'ensemble des valeurs mesurées à la coupelle de Casagrande. Le rapport du R.R.L. suggère un enfoncement de 20 mm. Ceci est dû à une différence entre la norme américaine (adoptée en France) et la norme britannique.

5.4. - LIMITE DE LIQUIDITE :

Le Swedish Geotechnical Institute (S.G.I.) propose de considérer comme limite de liquidité le "nombre de finesse" défini par KARLSON en 1961 comme étant la teneur en eau correspondant à un enfoncement de 1 cm du cône de 60 g, 60° . Le nombre de finesse (F) correspond à un point caractéristique de la courbe de consistance. Dans les conditions fixées ci-dessus, il satisfait la relation de HANSBO ($C_u = K \times Q/h^2$) avec un paramètre $\tau = 0,06$ bar, (C_u la cohésion non drainée, K une valeur empirique obtenue par étalonnage, Q le poids du cône, h la profondeur d'enfoncement, τ la résistance au cisaillement).

Adopter de considérer le nombre de finesse comme limite de liquidité reviendrait à changer de définition. Il est préférable de rechercher une relation permettant de déterminer la valeur de la limite de liquidité à partir du nombre de finesse. Ainsi, il est toujours possible d'effectuer des comparaisons géotechniques entre plusieurs sols, même si la limite de liquidité a été déterminée selon des modes opératoires différents.

PAUTE et MACE (1968) ont étudié la corrélation entre le nombre de finesse F et la limite de liquidité w_L (fig.5.1), en déterminant w_L par la méthode classique. Ils aboutissent aux régressions suivantes :

$$F = 0,91 w_t + 5,65$$

$$\text{et } WL = 1,088 F - 5,44$$

Le coefficient de corrélation est = 0,995.

La détermination de F se fait par la méthode en un seul essai de KARLSON. Il a établi un tableau reliant F à la profondeur du cône 60° (Tableau V.1.)

V.5. - LIMITE DE PLASTICITE

PAUTE et MACE (1968) ont, à la suite de certains auteurs, étudié la validité de la détermination de la limite de plasticité w_p à partir de l'essai au cône;

Ils ont adopté de définir "le nombre de plasticité P" la teneur en eau correspondant à $\tau = Q/h^2 = 0,85$ bar (avec un cône de 30°). La valeur de τ est différente de celle retenue par la norme GOST 5184-49 (URSS) recommandant l'utilisation d'un pénétromètre à cône de 30° pour la détermination de la limite de plasticité : $\tau = 1,9$ bar

Après avoir déterminé P par la méthode au cône et w_p par la méthode classique, PAUTE et MACE ont établi la régression liant ces deux paramètres (fig. V.2.)

$$P = 0,82 w_p + 5$$

$$w_p = 1,131 P - 3,00$$

Le coefficient de corrélation est $r = 0,967$

Ainsi que l'avait fait KARLSON pour la détermination de F, ils ont établi un tableau permettant de déterminer la valeur de P à partir de l'enfoncement d'un cône à 30° (tableau V.2.).

Toutefois, selon LEFLAIVE (1971), à la suite de son étude conduite au L.C.P.C., "il conviendrait de ne pas prendre en considération l'essai au pénétromètre à cône pour la détermination de la limite de plasticité car cette dernière a pour fondement la notion de fragilité et non pas celle de résistance au cisaillement, base du principe du pénétromètre à cône".

Il n'en demeure pas moins qu'une relation statistique existe entre le nombre de plasticité obtenu par l'essai au pénétromètre à cône et la limite de plasticité obtenue par l'essai classique.

h/mm	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
7	1,21 - 3,5	1,20 - 3,4	1,19 - 3,2	1,18 - 3,0	1,17 - 2,9	1,16 - 2,7	1,15 - 2,6	1,14 - 2,5	1,14 - 2,3	1,13 - 2,2	M N
8	1,12 - 2,1	1,11 - 1,9	1,11 - 1,8	1,10 - 1,7	1,10 - 1,6	1,09 - 1,4	1,09 - 1,3	1,07 - 1,2	1,07 - 1,1	1,06 - 1,0	M N
9	1,05 - 0,9	1,05 - 0,8	1,04 - 0,7	1,04 - 0,6	1,03 - 0,5	1,03 - 0,4	1,02 - 0,3	1,01 - 0,3	1,01 - 0,2	1,00 - 0,1	M N
10	1,00 ± 0	1,00 + 0,1	0,99 + 0,2	0,99 + 0,2	0,98 + 0,3	0,98 + 0,4	0,97 + 0,5	0,97 + 0,5	0,96 + 0,6	0,96 + 0,7	M N
11	0,96 + 0,7	0,95 + 0,8	0,95 + 0,9	0,94 + 0,9	0,94 + 1,0	0,94 + 1,1	0,93 + 1,1	0,93 + 1,2	0,93 + 1,3	0,92 + 1,3	M N
12	0,92 + 1,4	0,92 + 1,4	0,91 + 1,5	0,91 + 1,5	0,91 + 1,6	0,90 + 1,7	0,90 + 1,7	0,90 + 1,8	0,89 + 1,8	0,89 + 1,9	M N
13	0,89 + 1,9	0,88 + 2,0	0,88 + 2,0	0,88 + 2,1	0,88 + 2,1	0,87 + 2,2	0,87 + 2,2	0,87 + 2,2	0,87 + 2,3	0,86 + 2,3	M N
14	0,86 + 2,4	0,86 + 2,4	0,86 + 2,5	0,85 + 2,5	0,85 + 2,5	0,85 + 2,6	0,85 + 2,6	0,84 + 2,7	0,84 + 2,7	0,84 + 2,7	M N

Relation entre h, en dixièmes de millimètre, M et N. M et N se rapportent à la formule : $F = M \cdot w + N$
 où F = nombre de finesse pour la méthode du Swedish Geotechnical Institute (SGI) à 1 point, et
 h = pénétration du cône à la teneur en eau w (cône 60° — 60 g)

Tableau V.1. : Détermination du nombre de finesse

h (mm) (cône 0,4 kg)	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	12	13	14	15
h (mm) (cône 0,1 kg)					4		4,5		5		5,5	6	6,5	7	7,5
A	1,08	1,03	0,99	0,95	0,92	0,89	0,86	0,84	0,82	0,80	0,79	0,76	0,73	0,71	0,69
B	-0,41	-0,15	+0,06	+0,24	0,40	0,54	0,66	0,77	0,87	0,96	1,04	1,19	1,32	1,42	1,52

Relation entre la profondeur de pénétration h, exprimée en millimètres, et les coefficients A et B se rapportant à la formule
 $P = A \cdot w + B$
 où P est le nombre de plasticité, caractéristique voisine de la limite de plasticité w_p , h est la profondeur de pénétration
 correspondant à la teneur en eau w

Tableau V.2. : Détermination du nombre de plasticité.

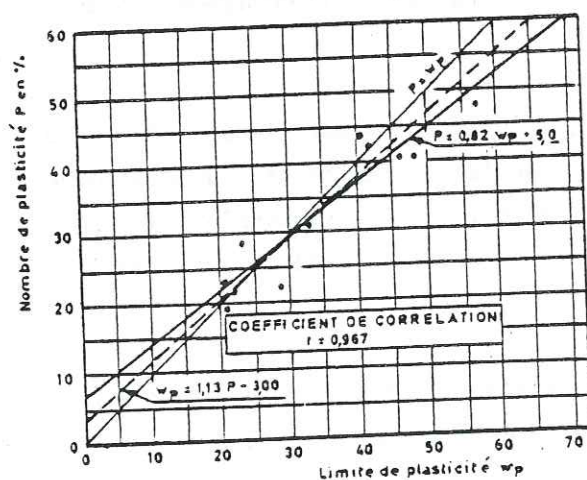


Figure V.2 : Corrélation entre le nombre de plasticité et la limite de plasticité.

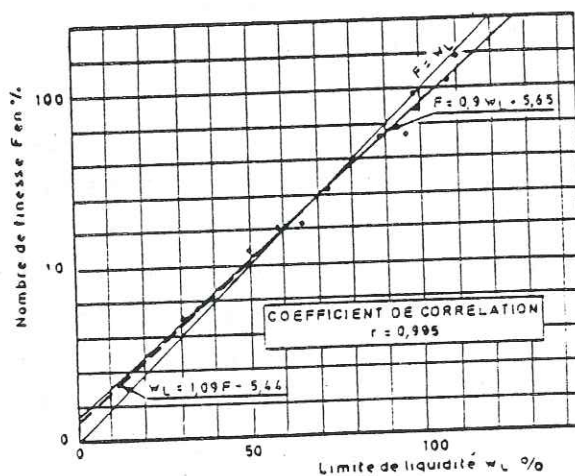


Figure V.1. : Corrélation entre le nombre de finesse et la limite de liquidité.

Les valeurs de w_p de nos échantillons ont été obtenues selon la méthode à un seul essai, proposée par PAUTE et MACE.

V.6. - LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT NON DRAINE (C_u)

Il est utile de rappeler que dans le comportement non drainé, l'application de l'effort est suffisamment rapide, eu égard à la perméabilité du sol (en fait au coefficient de consolidation C_c du sol) et à la longueur des chemins de drainage, pour induire des pressions interstitielles et pour que celles-ci ne puissent pas se dissiper avant la fin de l'application (LEGRAND J.).

Le "fall-cone" permet d'évaluer la cohésion C_u en de nombreux points d'un échantillon car, contrairement aux autres essais plus élaborés (scissomètre de laboratoire, triaxial), il n'est pratiquement pas destructif. La cohésion C_u est évaluée à partir de la relation

$$C_u = k \times Q/h^2 \text{ (HANSBO, 1957)}$$

La cohésion C_u est exprimée en bars, le poids Q du cône et de l'équipage mobile en kg et la profondeur h de pénétration du cône dans l'échantillon sous son propre poids en centimètres. k est une valeur empirique obtenue par étalonnage, qui dépend de l'angle au sommet du cône et du degré de remaniement de l'échantillon (PAUTE J.L. ; MACE Y. -1968).

B I B L I O G R A P H I E

- ALLEN (J.R.L.). - 1968 - Current ripples, their relation to patterns of water and sediment motion.
- North-Holland Publ. Comp. - 433 p.
- ALLENS (Y.T.), JOHNS (W.D.). -1960- Clays and clay minerals of New England and Eastern Canada. In :
Bull. Geol. Soc. Amer. , 71 - pp. 75-86.
- AMERICAN GEOLOGICAL INSTITUTE. - 1962 - Dictionary of geological terms. - First ed. 1957. -Dolphin Books,
New York. - 545 p.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. - 1977 - Sedimentation Engineering. - In : A.S.C.E., Manuals and
reports of engineering practice, 54. - 745 p.
- ANTEVS (E.) - 1922 - The recession of the last ice sheet in New England. - In : Amer. Geogr. Soc. Res. Ser.
11. - 120 p.
- ANTEVS (E.) - 1925 - Conditions of formation of varved glacial clays. - In : Bull. Geol. Soc. Amer. , 36.
- pp. 171-172.
- ANTEVS (E.) - 1951 - Glacial clay in Steep Rock Lake, Ontario, Canada. - In : Bull. Geol. Soc. Amer. , 62 -
- pp. 1223-1262.
- ANTEVS (E.) - 1957 - Geological tests of the varve and radiocarbon chronologies. - In : J. Géol., 65.
- pp. 129-148.
- ANTOINE (P.), FABRE (D.) - 1980 - Géologie appliquée au génie civil. - Masson, Paris. - 291 p.
- APRAHAMIAN (J.) - 1974 - La cristallinité de l'illite et les minéraux argileux en bordure des massifs cris-
tallins externes de Belledonne et du Pelvoux (Variations et relations possibles avec des événements
tectoniques et métamorphiques alpins). - In : Géologie alpine, t. 50 - Lab.Géol.Univ. 1
Grenoble. - pp. 5-16.
- ASHLEY (G.M.) - 1975 - Rythmic sedimentation in glacial Lake Hitchcock, Massachussetts, Connecticut. - In :
Jopling, A.V. and Mc Donald, B.C., Ceds. : Glaciofluvial and Glaciolacustrine sedimentation.
- Soc. of Econ. Paleont. and Min. Spec. Publ., 23. - pp. 304-320.
- AUMAITRE (R.), BUFFET (G.) - 1973 - Minéralogie, Pétrographie et Géochimie des laves spilitiques et des filons
basiques associés du massif des Ecrins, Pelvoux. - Thèse doct. 3è cycle, Grenoble.
- BANERJEE (I.) - 1968 - A study of glacial varves as Turbidites. - In : Abstr. Meet. Amer. Géol. Soc.,
Washington D. C., Febr. 1968. - pp. 335-336.
- BANERJEE (I.) - 1973 - Nature of the grain size distribution of some pleistocène glacial varves of Ontario,
Canada. - In : Géol. Survey of Canada, n° 226. - pp. 40-57.
- BERGSTROM (R.) - 1968 - Stratigraphy and ice recession in the southern part of Västerbotten. - In : County
Sver. Géol. Unders., Ser. C., n° 634. - 76 p.
- BOUMA (A. H.) - 1962 - Sedimentology of some flysch deposits. - Elsevier, Amsterdam. - 168 p.

- BOYKO-DIAKONOW (M.) - 1978 - The laminated sediments of Crawford Lake, Southern Ontario. - In : Proc. of an INQUA Symp. of genesis and lithology of quaternary deposits, Zurich, 10-20 sept. 1978.
- BRINDLEY (G. W.) - 1961 - Quantitative analysis of clays mixtures. In: BROWN : the X-ray identification and crystal structures of clay minerals. - Min. Soc., London. - pp. 489-514.
- BROUSSE (.) - 1975 - Précis de géologie, t. 1. - 2^e éd. - Dunod Université, Paris. - p. 262.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.) - 1963 - Minéralogie des argiles. - Masson, Paris. - 355 p.
- CAMPBELL (C.V.) - 1967 - Lamina, laminaset, bed and bedset. - In : Sedimentology, 8. - pp. 7-26.
- CARROL (D.) - 1970 - Clay Minerals : a guild to their X-Rays Identification. - In : Géol. Soc. Amer., Spec. paper, 126. - 80 p.
- CASAGRANDE (A.) - 1958 - Notes on the design of the liquid limit device. - In : Geotechnique, 8. - pp. 84-91.
- CHIKITA (K.) - 1977 - Sedimentation by turbidity currents, Katsunazawa reservoir. - In : Jap. J. Limnol., 38 - pp. 48-61.
- COAKLEY (.), BEAL (.) - 1971 - Sedan, Computer program for sediments particle size analyses. - In : Spec. publ. Dept. of environment, Canada Center for Inland waters.
- COHEN (J.N.) - 1978 - Deltaic sedimentation in glacial Lake Blessington County Wicklow, Ireland. - In : Proc. of an INQUA Symp. on genesis and lithology of quaternary deposits, Zurich, 10-20 sept. 1978.
- COLLET (L.W.) - 1925 - Les lacs, leur mode de formation, leurs eaux, leur destin. - Doin, Paris. - 320 p.
- COLLINI (B.) - 1956 - On the origin and formation of the fennoscandian quaternary clays. - In : Géol. Fören. Stock. Färh, 78 - pp. 528-534.
- COMITE FRANCAIS DES GRANDS BARRAGES. Groupe de Travail du Comité Français des Grands Barrages. - 1976 - Problèmes de sédimentation dans les retenues. - In : Com. Int. Grands Barrages, 12e Congr. Grands Barrages, Mexico, Q.47, R.30. - pp. 1177-1208.
- COMMISSION GEOTECHNIQUE DES CHEMINS DE FER SUEDOIS (Geotechnical Commission of the Swedish State Railways). - 1922 - Final Report. - In : Stat. Härnv. Geot. Medd. Stockholm, 2.
- COSTET (J.), SANGLERAT (G.) - 1975 - Cours pratique de mécanique des sols, plasticité et calcul des tassements. - Dunod, Paris. - 263 p.
- DE GEER (E.H.) - 1910 - A geochronology of the last 12 000 years. In : 11th Int. Géol. Stockholm, I, 1912. - pp. 241-253.
- DE GEER (E.H.) - 1935 - Prehistoric Bulwack biochronologically dated. - In : Géol. Ann. 17.
- DE GEER (E.H.) - 1955 - La déglaciation scandinave selon la chronologie De Geer (105/1954). - In : Bull. Soc. Géol. France, 6^e ser., T.V.
- DEGENS (E.T.), PALUSKA (A.), ERIKSSON (E.) - 1976 - Rates of soil erosion. In : Svensson, B.H. and Söderlund, R. (Eds.), Nitrogen, phosphorus and sulfur-global cycles. - Econ. Bull., Stockholm, 22. - pp. 185-191.
- DEGENS (E.T.), STOFFERS (P.), GOLUBIC (C.S.), DICKMAN (M.D.). - 1975 - Varves chronology : estimated rates of sedimentation in the Black Sea deep bassin. - In : Initial reports of the deep sea drilling project / 1975, Istanbul/ Turkey to Istanbul, 1975, 42, 2. - pp. 499-508.
- DELL (C.I.) - 1973 - A special mechanism for varve formation in a glacial lake. - In : J. Sed. Petrol, U.S.A., 43, 3. - pp. 838-840.

- DE LORY (F.) - 1960 - A preliminary study of the geotechnical properties of varved clays as reported in Canadian Engineering Case Records. - In : N.R.C. Tech. Memo., 69, 14th Canadian Soil Mechanics Conf. -
- ENCYCLOPEDIA OF SEDIMENTOLOGY. - 1978 - Encyclopedia of Earth Sciences Series, vol. VI. - Rhodes W. Fairbridge, Joanne Bourgeois. - 901 p.
- FEININGER (T.) - 1971 - Chemical weathering and glacial erosion of crystalline rocks and the origin of till. - In : U.S. Géol. Survey Prof. Paper, 750-C. - pp. C65-C81.
- FOLK (R.L.), WARD (W.T.) - 1957 - Brazos River Bur., a study in the significance of grain size parameters. - In : J. Sed. Petrol., 27. - pp.3-27.
- FOSTER (M.D.) - 1962 - Interprétation of the composition and a classification of the chlorites. - In : U.S.G.S., prof. paper, 414-A. - p. 33.
- FOUCAULT (A.), RAOULT (J.F.) - 1980 - Dictionnaire de géologie. - Masson, Paris. - 336 p.
- FRIEDMANN (G.M.) - 1961 - Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics. - In : J. Sed. Petrol., 31. - pp. 514-529.
- FRIEDMANN (G.M.), SANDERS (J.E.). - 1978 - Principles of sedimentology. - Joyn Willey and Sons, New York - 792p.
- GARY (M.), Mc AFFEE (R.), WOLF (C.L.) - 1972 - Glossary of geology. - In : Amer. Géol. Inst., Washington, D.C. - 823 p.
- GIGNOUX (M.), BARBIER (R.) - 1955 - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. - Masson, Paris.
- GILBERT (G.K.) - 1885 - The topography features of lake shores. In : Amer.Rept. U.D. Geol. Survey, 5. - pp. 69-123.
- GOULD (H.R.) - 1960 - Turbidity currents. - In : W.O. Smith et al., Comprehensive survey of sedimentation lake Mead, 1948/1949. - Géol. Surv. Paper, 295. - pp. 201-207.
- GUSTAVSON (T.C.) - 1975 - Bathymetry and sediment distribution in proglacial Malaspina, Alaska. - In : J. Sed. Petrol. 45. - pp. 738-744.
- GUSTAVSON (T.C.), ASHLEY (G.M.), BOOTHROYD (J.C.) - 1975 - Depositional sequences in glaciolacustrine deltas. In : Jospling A.V. and Mc Donald B.C. Ceds : Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation, Soc. of Econ. Paleont. and Miner. Sp. publ.23. - pp. 264-280.
- HAMMEN (T.V.D.), WIJMSTRA (T.A.), ZAGWIJN (W.H.) - 1971 - The floral record of the Late Cenozoic Glacial ice ages. - In : Late Cenozoic Glacial ages, Turekian K.K., Yale Univ. Press, New Haven and London. - pp. 391-424.
- HANSBO (S.) - 1957 - A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. - In : Swedish Géotech. Inst., Proceed. n° 14, traduction L.P.C. St-Brieuc, fiche 7621 A.F.
- HANSON (G.) - 1932 - Varved clays of Tide Lake, British Columbia. - In : Trans. Roy. Soc. Can., sect. 3. - PP. 225-341.
- HEY (M.H.) - 1954 - A new review of the chlorites. - In : Min. Mag., 30. - pp. 227-292.
- HORNER (N.G.) - 1948 - A late glacial : specimen of Luciaperca Luciaperca and its environment (a study of some upper clay varves. - In Geol. Inst. Uppsala Univ. Bull., 85. - pp. 195-276.
- HUFF (W.D.) - 1974 - Mineralogy and provenance of Pleistocene clay in an alpine region. - In : Geol. Soc. Amer. Bull. , 85. - pp. 1445-1460.
- INGRAM (R.L.) - 1954 - Vertical profiles of modern sediments along the North Carolina Coast. - In : South-eastern Géol., 9. - pp. 237-244.

- JARNEFORS (B.) - 1956 - Isrecessionem inom Uppsalaområdet. - In : Geol. Fören. Förhandl., 78. - pp. 301-315.
- KARLSON (P.) - 1961 - Suggested improvements in the liquid limit test with reference to flow properties of remoulded clays. - In : Swedish Geot. Inst. Cong. int. de Mécanique des sols, Paris 1961, Dunod Ed., traduction L.P.C. St-Brieuc. - D. 320.
- KELTS (K.) - 1978 - Postglacial varved sedimentation lakes Zurich and Zug, Switzerland. In : Symposium INQUA 1978, ETH Zurich, Switzerland.
- KEMPE (S.) - 1977 - Hydrographie, Warven-Chronologie und organische Geochemie des Van Sees, Ost-Türkei. In : Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg 47. - pp. 125-228.
- KRUMBEIN (W.C.) - 1936 - Application of logarithmic moments to size frequency distributions of sediments. - In : J. Sed. Petrol. 6. - pp. 35-47.
- KUBLER (B.) - 1964 - Les argiles, indicateurs de métamorphisme. - In : Rev. Inst. Fr. Petrol., t. 19. - pp. 1093-1112.
- KUBLER (B.) - 1968 - Evaluation quantitative du métamorphisme par les cristallinités de l'illite. - In : Bull. Centre de rech. Pau. S.N.P.A., 2. - pp. 385-394.
- KUENEN (P.H.) - 1951 - Mechanics of varves formation and the action of turbidity currents. - In : Géol. Fören. Förhaldl. 73. - pp. 68-84.
- KUENEN (P.H.) - 1951 - Properties of turbidity currents of high density. - In : Soc. of Econ. Paleont. and Miner., Spec. Publ., 2, Oklahoma U.S.A., Symp. on turbidity currents. - pp. 14-33.
- KUENEN (P.H.) - 1953 - Significant features of graded bedding. - In : Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 37. - pp. 1044-1066.
- LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES - 1965 - Modes opératoires - Dunod, Paris.
- LAFOND (R.), RIVIERE (A.), VERNHET (S.) - 1961 - Etude de la composition minéralogique de quelques argiles glaciaires. - In : C.R. Acad. Sc., 252. - p. 3310.
- LAMBERT (A.M.) - 1976 - Measurements of density underflows from Walensee, Switzerland. - In : Sedimentology, 23. - pp. 87-105.
- LAMBERT (A.M.) - 1979 - Non annual cycles of varve like sedimentation in Walensee, Switzerland. - In : Sedimentology, 26. - pp. 453-461.
- LAMBERT (A.M.), KELTS (K.A.), MARSHALL (N.F.) - 1976 - Measurements of density underflows from Walensee, Switzerland. - In : Sedimentology, 23. - pp. 87-105.
- LEFLAIVE (E.) - 1971 - Les limites d'Atterberg et le pénétromètre à cône. - In : Bull. Liais. L.P.C., n° 50, janv.-févr. 1971, réf. 972. - pp. 123-131.
- LEFORT (P.), PECHER (A.) - 1971 - Géologie des terrains cristallins de la Meije (Alpes du Haut-Dauphiné, France). - In : Géologie alpine, t. 47. - pp. 69-78.
- LINEBACK (J.A.), DELL (C.I.), GROSS (D.L.) - 1979 - Glacial and postglacial sedimentation in lakes Superior and Michigan. - In : Géol. Soc. Amer. Bull., 90, 8. - pp. 781-791.
- MAC KEE (E.D.), GOLDBERG (M.) - 1969 - Experiments on formation of conformed structures in mud. - In : Géol. Soc. Amer. Bull., 80. - pp. 231-244.

- MASSON (C.C.), FOLK (R.L.) - 1958 - Differentiation of beach, dune and aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas. - In : J. Sed. Petrol., 28, 2. - pp. 211-226.
- MASSARI (P.), SORBINI (L.) - 1975 - Aspects sédimentologiques des couches à poissons de l'Eocène de Bolca (Vérone, Italie). - In : 9th Cong. Int. Sediment., Nice, 10. - pp. 55-61.
- MILLOT (G.) - 1963 - Géologie des argiles - Masson, Paris - 499 p.
- MONJUVENT (G.) - 1971 - Le Drac, morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaire d'un bassin alpin. - In : Thèse Univ. Paris VII. - 433 p.
- MONJUVENT (G.), USELLE (J.P.) - 1973 - Interprétation des "argiles d'Eybens", d'après la sédimentologie du sondage INQUA 1969. - In : Bull. Ass. Franç. pour l'étude du quaternaire, 10, 35 - pp. 103-128.
- PASSEGA (R.) - 1957 - Texture and characteristic of clastic deposition. - In : Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists, 41. - pp. 1952-1984.
- PAUTE (J.L.), MACE (Y.) - 1968 - Le pénétromètre de consistance, évaluation de la consistance des sols fins. - In : Bull. Lab. Rout. P. et Ch., 33, août-sept. 1968, réf. 540. - pp. 105-116.
- PECHER (A.) - 1971 - Données nouvelles sur les granites paléozoïques du Massif des Ecrins-Pelvoux, Alpes du Haut-Dauphiné, France. - In : Géol. Alpine, t. 47, fasc.1. - pp. 91-102.
- PETRUK (W.) - 1964 - Determination of the heavy atom content in chlorite by means of the X-ray diffractometer. - In : Amer. Min., vol. 49. - pp. 61-71.
- REINECK (H.E.), SINGH (I.B.) - 1973 - Depositional sedimentary environments. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. - 439 p.
- REYNOLDS (R.C.J.) - 1971 - Clay mineral formation in an alpine environment. - In : Clays and Clay minerals, vol. 19. - pp. 361-374.
- ROSENQUIST (I.T.) - 1955 - Investigations in the clay electrolyte water system. - In : Geotekn. Inst. Publ. - pp. 9-30.
- ROSS (D.A.), DEGENS (E.T.) - 1974 - Recent sediments in Black Sea. - In : Amer. Ass. Petrol. Géol. Mem., 20. - pp. 183-199.
- SANDERS (J.E.) - 1965 - Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related resedimentation mechanisms. - In : Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation. - Middleton, Soc. Econ. Paleont. Miner. Sp. publ., 12. - pp. 192-219.
- SAURAMO (M.) - 1923 - Studies on the quaternary varve sediments in Southern Finland. - In : Comm. Géol. Finl. Bull. 60. - 164 p.
- SCHRADER (H.) et Al. - 1980 - Laminated diatomaceous sediments from the Guyanas basin slope, Central Gulf of California : 250 000-year climate record. - In : Science, 207. - pp. 1207-1209.
- SCHLUCHTER (C.), KNECHT (Ú.) - 1979 - Intrastratal contortions in a glaciolacustrine sediment sequence in the eastern Swiss plain. - In : Moraines and varves, Balkena, Rotterdam.
- SCHWARZBACH (M.) - 1940 - Das diluviale Klima während des Höchststandes einer Vereisung. - In : Z. Deut. Geol. Ges. 92. - pp. 565-582.
- SERRUYA (C.) - 1969 - Les dépôts du lac Léman en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre. - In : Arch. Sci. Genève, 22, 1. - pp. 125-254.

- SHAW (J.), ARCHER (J.) - 1978 - Winter turbidity current deposits in Late Pleistocene glaciolacustrine varves, Okanagan Valley, British Columbia, Canada. - In : *Boreas*, 9, mars 1978. - pp. 123-130.
- SHEPARD (F.P.) - 1954 - High velocity turbidity currents, a discussion. - In : Royal Soc. London, Proc. Série A, 222. - pp. 323-326.
- SIKIROJI (L.), FABRE (D.), GIRAUD (A.) - 1982 - L'envasement de la retenue du Chambon, Alpes françaises, après un demi-siècle d'exploitation. - In : IVe Congr. Int. IAEG, New-Delhi, India, déc. 1982. (à paraître).
- STUMPF (W.) - 1916 - Methode der Deltavermessungen der Abteilund für Wasserwirtschaft. - In : Ann. Scheuz. Landeshydrographie, II.
- STURM (M.) - 1978 - Origin and composition of clastic varves. - In : Proc. of an INQUA Symp. on genesis and lithology of quaternary deposits, Zurich, Switzerland, 10-20 sept. 1978.
- STURM (M.) - 1978 - Postglacial sediments in Lake Brienz. - In : Excursion Guidebook, INQUA Symp. "Moraines and Varves", Zurich; Switzerland. - pp. 28-38.
- STURM (M.), MATTER (A.) - 1978 - Turbidites and varves in Lake Brienz, Switzerland, deposition of clastic detritus by density currents. - In : Sp. Publ. Int. Ass. Sediment. 2. - pp. 147-168.
- TATLOCK (D.B.) - 1966 - Rapid model analysis of some felsic rocks from calibrated X-ray diffraction patterns. - In : Géol. Survey Bull., 1209. - 41 p.
- THEVENIN (J.) - 1960 - Etude de la sédimentation des barrages réservoirs en Algérie et moyens mis en oeuvre pour préserver les capacités. - In : Ann. Inst. techn. Bât. et Trav. Pub., déc. 1960.
- TEN HAFF (E.) - 1959 - Graded bed of the Northern Apenines. - In : Doc. Thesis, Univ. Groningen. - 102 p.
- TOLQVEN (M.) - 1978 - Paleocology of annually laminated sediments in Lake Ahvenainen, S. Finland, comparison of dating methods. - In : Ann. Bot. Fenn., 15, 3, 22. - pp. 209-222.
- TRASK (P.D.) - 1950 - Applied Sedimentation. - Wiley and Son, New-York. - 707 p.
- VATAN (A.) - 1967 - Manuel de sédimentologie. - Technip, Paris. - 397 p.
- VIVIAN (H.) - 1979 - Erosion et transports solides du haut Drac, en amont de la retenue du Sautet. - Rapport Glaciolab., Univ. Grenoble.
- WENTWORTH (C.K.) - 1922 - A scale of grade and class terms for clastic sediments. - In : J. Géol., 30 - pp. 377-392.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Pages

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

1.1.	Carte géologique simplifiée du bassin versant de la Romanche à l'amont du barrage du Chambon	6
1.2.	Températures moyennes à La Grave-le Chazelet de 1968 à 1978	8
1.3.	Courbes de probabilité des précipitations à La Grave-le Chazelet de 1949 à 1979	10
1.4.	Courbes de probabilité des débits moyens mensuels à la station Chambon amont de 1936 à 1975	12
1.5.	Débits moyens journaliers de la Romanche à la station Chambon amont en 1980	14
1.6.	Variations mensuelles de la cote du lac du Chambon	16
1.7.	Profil transversal du barrage du Chambon passant à peu près par les points les plus bas de la maçonnerie	18

CHAPITRE 2

2.1.	Exemples de stratification thermique due aux variations de densité de l'eau selon la température	26
2.2.	Distribution des courants et sédiments types en résultant, dans le cas d'une sédimentation clastique dans un lac oligotrophique à stratification thermique annuelle	28

CHAPITRE 3

3.1.	Plan montrant la morphologie de la retenue lors de la vidange de 1981	46
3.2.	Coupes montrant la morphologie de la retenue lors de la vidange de 1981	47
3.3.	Morphologie du delta du torrent de la Pisse	48
3.4.	Histogrammes de fréquence simple et courbes cumulatives en ordonnée arithmétique montrant l'appauvrissement du canal 5 phi correspondant à la séparation entre les techniques d'analyse granulométrique	58
3.5.	Signification de l'asymétrie	62
3.6.	Signification des courbes cumulatives en ordonnée de probabilité	62
3.7.	Diagramme de PASSEGA	64
3.8.	Localisation des prélèvements et des coupes de la figure 5.2.	66
3.9.	Coupe détaillée et teneurs en eau du prélèvement CT1	67
3.10.	Granulométrie du prélèvement CB1 : courbes cumulatives en ordonnée arithmétique et diagramme triangulaire (argile - silt - sable)	69
3.11.	Situation des échantillons du prélèvement CB1 dans le diagramme de PASSEGA	71
3.12.	Coupe détaillée du prélèvement CT7	72
3.13.	Granulométrie du prélèvement CT7 : courbes cumulatives en ordonnée arithmétique et diagramme triangulaire (argile - silt - sable)	78
3.14.	Granulométrie de l'échantillon CT7-1-40 : courbe cumulative en ordonnée arithmétique et histogramme de fréquence simple	79
3.15.	Situation des échantillons du prélèvement CT7 dans le diagramme du PASSEGA	80
3.16.	Coupe du prélèvement CT8	81
3.17.1.	Courbes cumulatives en ordonnée arithmétique des échantillons A, B, C du prélèvement CT8	83
3.17.2.	Courbes cumulatives en ordonnée arithmétique des échantillons J à K du prélèvement CT8	83
3.17.3.	Fuseau des courbes cumulatives en ordonnée arithmétique des échantillons J à R du prélèvement CT8	84

	<u>Pages</u>
3.18. Situation des échantillons du prélèvement CT8 dans le diagramme de PASSEGA	82
3.19.1. Coupe détaillée du prélèvement C23	86
3.19.2. Paramètres granulométriques du prélèvement C23	86
3.20. Granulométrie du prélèvement C23 : courbes cumulatives en ordonnée arithmétique et diagramme triangulaire (argile - silt - sable)	88
3.21. Situation des échantillons du prélèvement C23 dans le diagramme de PASSEGA	89
3.22. Coupe détaillée du prélèvement C17	89
3.23. Coupe détaillée du prélèvement C26	90
3.24. Coupe détaillée et paramètres granulométriques du prélèvement C21 ("une turbidite")	92
3.25. Courbes granulométriques cumulatives en ordonnée arithmétique du prélèvement C21	93
3.26. Courbes granulométriques cumulatives en ordonnée de probabilité du prélèvement C21	
3.27. Diagramme triangulaire (argile - silt - sable) du prélèvement C21	94
3.28. Situation des échantillons du prélèvement C21 dans le diagramme de PASSEGA	94
3.29. Corrélation entre le diamètre moyen et l'aplatissement	98
3.30. Corrélation entre le diamètre moyen et l'asymétrie	98
 <u>CHAPITRE 4</u>	
4.1. Exemple de diffractogramme de rayons X	105
4.2. Composition minéralogique des poudres totales et des fractions inférieures à 63 microns	107
4.3. Corrélation entre la teneur en quartz et le diamètre moyen	110
4.4. Corrélation entre la teneur en calcite et le diamètre moyen	110
4.5. Corrélation entre la teneur en illite et le diamètre moyen	111
4.6. Détermination des chlorites des alluvions et de celles du Lias	115
 <u>CHAPITRE 5</u>	
5.1. Profils en long des échosondages de 1974, 1977, 1979, dans l'axe de l'ancien lit de la Romanche	120
5.2. Coupes sériées montrant le taux d'envasement observé lors de la vidange de 1981	123
5.3. Estimation des volumes d'alluvions admis puis évacués ou conservés	125
5.4. Débits moyens hebdomadaires et débits solides cumulés lors de la vidange de la retenue du Chambon du 5 janvier au 31 mai 1981	127
5.5. Pourcentages d'alluvions admis puis évacués ou conservés, suivant la distance au barrage	125
 <u>CHAPITRE 6</u>	
6.1. Variation de la teneur en eau dans un échantillon d'argile varvée (DE LORY, 1960)	142
6.2. Corrélation entre la teneur en eau et le diamètre moyen du prélèvement CT7	143
6.3. Corrélation entre la teneur en eau et la teneur en argile des échantillons du prélèvement CT7	143
6.4. Corrélation entre la teneur en eau et le diamètre moyen des échantillons des prélèvements CT1 et CB1	144
6.5. Corrélation entre la teneur en eau et la teneur en argile des échantillons des prélèvements CT1 et CB1	144
6.6. Variation du poids volumiques en fonction de la profondeur du prélèvement CT7	145

	<u>Pages</u>
6.7. Situation de huit échantillons dans le diagramme de plasticité de Casagrande	146
6.8. Variation de la cohésion non drainée en fonction de la profondeur du prélèvement CT7	149
6.9. Résultat de deux essais pénétrométriques dynamiques	157
6.10. Courbes oedométriques de l'échantillon CS1-4 (intact, puis remanié)	153

ANNEXES

II.1. Courbes granulométriques cumulatives en ordonnée arithmétique d'échantillons étudiés par densimétrie et au coultre analyser	164
II.2. Situation des échantillons dans le diagramme de PASSEGA	166
III.1. Intensités relatives moyennes de diverses fractions granulométriques de calcite et de quartz (d'après TATLOCK, 1966).	169
IV.1. Abaque de PETRUK (1964) pour la détermination des chlorites	173
IV.2. Classification des chlorites, selon HEY (1954)	173
V.1. Corrélation entre le nombre de finesse et la limite de liquidité	180
V.2. Corrélation entre le nombre de plasticité et la limite de plasticité	180

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

1.1. Moyennes mensuelles et saisonnières des températures à La Grave-le Chazelet de 1968 à 1978	9
1.2. Répartition mensuelle des jours de gel et des jours sans dégel à La Grave-le Chazelet	9
1.3. Précipitations à La Grave-le Chazelet de 1949 à 1979	10
1.4. Débits moyens mensuels et annuels de la Romanche à la station Chambon amont de 1936 à 1975	13
1.5. Débits moyens journaliers maximaux de la Romanche à la station Chambon amont de 1948 à 1981	15

CHAPITRE 2

2.1. Types de dépôts idéaux résultant de deux paramètres hydrologiques (stratification de l'eau et apports détritiques) dans un lac oligotrophique à sédimentation clastique	36
2.2. Définition de "lamines" et "silt" s	40
3.1. Classifications granulométriques selon SHEPARD, WENTWORTH et ATTERBERG. Correspondence entre l'échelle millimétrique et celle des phi	60
3.2. Formulation et signification des principaux paramètres granulométriques statistiques	62
3.3. Paramètres granulométriques du prélèvement CB1	65
3.4. Paramètres granulométriques du prélèvement CT7	77
3.5. Paramètres granulométriques des sables du prélèvement CT8	84
3.6. Paramètres granulométriques du prélèvement C23	87
3.7. Paramètres granulométriques des échantillons du prélèvement C21	92

CHAPITRE 4

4.1. Teneurs minéralogiques des poudres totales et des fractions granulométriques inférieures à 63 microns	106
--	-----

	<u>Pages</u>
4.2. Teneurs minéralogiques des poudres des fractions granulométriques inférieures à 2 microns	109
4.3. Minéralogie des schistes du Lias dans le bassin versant de la Romanche	113

CHAPITRE 6

6.1. Nombre de finesse, nombre de plasticité et indices déduits. Classification correspondante du L.C.P.C.	142
6.2. Cohésion non drainée et sensibilité des échantillons des prélèvements CT7 et CT1	148
6.3. Détermination du coefficient de consolidation et de la perméabilité de l'échantillon CS1 intact puis remanié	152

ANNEXES

II.1. Etude comparative des paramètres des courbes granulométriques obtenues par la densimétrie et par le Coulter Analyser	163
III.1. Identification semi-quantitative par diffraction X de minéraux d'une poudre non orientée	171
V.1. Détermination du nombre de finesse	180
V.2. Détermination du nombre de plasticité	180

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

1. "Mud-cracks"	50
2. Superposition de deux couches silto-argileuses affectées de "mud-cracks"	50
3. Bourrelet à la surface d'une terrasse alluviale	51
4. Coupe d'un bourrelet surmontant un "mud-crack"	51
5. "Frondescent-casts"	54
6. "Ripple-marks".	54
7. Convolutes	56
8. Convolutes	56

TABLE DES MATIERES

<u>AVANT-PROPOS</u>	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	1
<u>CHAPITRE 1 : GENERALITES</u>	3
1.1. Situation géographique	5
1.2. Géologie du bassin versant de la Manche	5
1.3. Données climatiques et hydrauliques	7
1.3.1. Températures	4
1.3.2. Précipitations	11
1.3.3. Débits	13
1.3.4. Conclusions : Fluctuations de la cote du lac	17
1.4. Caractéristiques techniques de l'aménagement	17
1.4.1. Fiche technique	17
1.4.2. Particularités du site de l'ouvrage	19
<u>CHAPITRE 2 : VARVES ET LAMINES</u>	21
2.1. Historique du mot "varve"	23
2.2. Composition minéralogique et origine des minéraux argileux des varves	23
2.3. Validité de la géochronologie par les varves	25
2.4. Mode de dépôt	26
2.4.1. Milieu lacustre	26
2.4.1.1. Rôle de la stratification thermique	26
2.4.1.2. Rôle des courants de densité	27
2.4.1.3. Origine et formation des varves clastiques	28
2.4.1.4. Quelques exemples	32
2.4.1.4.1. Les varves clastiques du lac de Brienz (Suisse)	32
2.4.1.4.2. Les varves postglaciaires des lacs de Zurich et de Zug (Suisse)	32
2.4.1.4.3. Les varves pleistocènes de l'Okanagan, Colombie Britannique (Canada)	33
2.4.1.4.4. Les varves du lac de Walensee (Suisse)	33
2.4.1.4.5. Les varves glaciaires pléistocènes de l'Ontario (Canada)	35
2.4.1.5. Conclusions	35
2.4.2. Milieu lagunaire	36
2.4.3. Milieu saunâtre	37
2.4.3.1. Les varves holocènes de la Mer Noire	37
2.4.3.2. Les varves du lac de Van (Turquie)	37
2.4.3.3. Les varves du Golfe Central de Californie	37
2.5. Conclusions : proposition d'une nouvelle terminologie	39
<u>CHAPITRE 3 : SEDIMENTOLOGIE DES ALLUVIONS DU CHAMON</u>	43
3.1. Morphologie des dépôts	45

	<u>Pages</u>
3.1.1. Le chenal	45
3.1.2. Les terrasses	45
3.1.3. Le delta du torrent de la Pisse	48
3.1.4. Les figures sédimentaires	49
3.1.4.1. Les "mud-craks"	49
3.1.4.2. Les bourrelets	52
3.1.4.3. Les "frondescant-casts"	53
3.1.4.4. Les "bird-eyes"	55
3.1.4.5. Les "ripple marks"	55
3.1.4.6. Les convolutes	55
3.2. L'analyse granulométrique	57
3.2.1. La méthode	57
3.2.1.1. Les techniques	57
3.2.1.2. Les paramètres utilisés en granulométrie	59
3.2.1.2.1. Les classifications granulométriques	59
3.2.1.2.2. La statistique	61
3.2.1.2.3. Les paramètres déduits des graphiques	61
3.3. Les résultats	66
3.3.1. Les prélèvements CT1 et CB1	66
3.3.2. Le prélèvement CT7	71
3.3.3. Le prélèvement CT8	82
3.3.4. Les dépôts intervidanges	85
3.3.4.1. Le dépôt entre les vidanges de 1980 et 1981 (C23)	85
3.3.4.2. Le dépôt entre les vidanges de 1981 et 1982 (C26)	90
3.3.5. Le prélèvement C21 : une "turbidite"	91
3.4. Conclusions	96
 <u>CHAPITRE 4 : COMPOSITION DES ALLUVIONS</u>	 101
4.1. Teneur en matière organique	103
4.2. Minéralogie des alluvions	103
4.2.1. La méthode	103
4.2.2. Les résultats	103
4.3. Comparaison de la minéralogie des alluvions avec celle des roches du bassin versant	112
4.3.1. Les schistes du Lias	112
4.3.2. Le cristallin du Massif de la Meije	114
4.4. Conclusions	116
 <u>CHAPITRE 5 : ETUDE QUANTITATIVE DE L'ALLUVIONNEMENT</u>	 117
5.1. Estimation du taux d'alluvionnement à proximité du barrage	119
5.1.1. La vidange du 1960	119
5.1.2. Les sondages par ultrasons	119
5.1.2.1. Le sondage de 1972	121
5.1.2.2. Comparaison des sondages de 1972 et 1973	122
5.1.2.3. Comparaison des sondages de 1974, 1977, 1979	122
5.1.2.4. Remarques sur la technique employée	122

	<u>Pages</u>
5.2. Estimation du volume d'alluvions	124
5.3. Les facteurs d'érosion	129
5.4. Efficacité des vidanges	131
5.5. Conclusions	132
 <u>CHAPITRE 6 : PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES ALLUVIONS</u>	 135
6.1. Les méthodes	137
6.1.1. Les caractéristiques d'identification	137
6.1.1.1. Teneur en eau	137
6.1.1.2. Poids volumiques	137
6.1.1.3. Consistance	138
6.1.1.3.1. Les limites d'Atterberg	138
6.1.1.3.2. Les indices de consistance	138
6.1.2. Les caractéristiques mécaniques	139
6.1.2.1. Le cisaillement	139
6.1.2.2. La résistance à la pénétration dynamique	139
6.1.2.3. La compressibilité	140
6.2. Les résultats	141
6.2.1. Les essais d'identification	141
6.2.1.1. Teneur en eau	141
6.2.1.2. Poids volumiques	141
6.2.1.3. Consistance	144
6.2.1.4. Les essais géophysiques	147
6.2.2. Les essais mécaniques	147
6.2.2.1. Le cisaillement	147
6.2.2.2. La résistance à la pénétration dynamique	150
6.2.2.3. La compressibilité	150
6.3. Conclusions	154
 <u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	 157
<u>ANNEXES</u>	159
I Techniques de prélèvements	161
II Etude comparative de deux techniques d'analyse granulométrique des particules inférieures à 63 microns	163
III L'analyse semi-quantitative des minéraux par diffraction x	167
IV Détermination de la composition approchée des chlorites	172
V Le "Fall-cone"	176
 <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	 183
 <u>LISTE DES ILLUSTRATIONS</u>	 189
 <u>TABLE DES MATIERES</u>	 193

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 7.06.82

Le Président de la thèse

Straley

Vu, et permis d'imprimer,

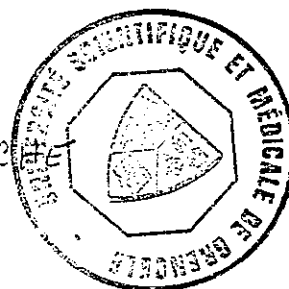
Grenoble, le 8.6.82

Le Président de l'Université Scientifique et Médicale

1 JUIL. 1982

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL. (76) 87.46.43

M. TANC



RESUME

Le barrage du Chambon, situé sur la Romanche, dans les Alpes françaises, a été mis en eau en 1935. Depuis cette date, des sédiments s'accumulent dans la retenue. Au bout de 45 ans, ceux-ci ont atteint 18 mètres d'épaisseur au pied de l'ouvrage. La vidange totale, réalisée en 1981, a fourni l'occasion d'étudier ces dépôts, avec les objectifs suivants:

- expliquer leur mode de mise en place par l'observation des figures sédimentaires, des analyses granulométriques et minéralogiques;
- évaluer les volumes déposés dans la retenue ainsi que le taux d'érosion dans le bassin versant;
- étudier l'efficacité des vidanges comme moyen de lutte contre l'envasement de la retenue;
- caractériser les propriétés géotechniques des sédiments, particulièrement leur aptitude aux tassements.

UNIVERSITE DE GRENOBLE 1
INSTITUT DE GEOLOGIE
DOCUMENTATION
RUE MAURICE-GIGNOUX
F 38031 GRENOBLE CEDEX
TEL (76) 87.46.43

1 JUL. 1982

MOTS.CLES

France / Alpes / Romanche / lac artificiel/sédimentation lacustre / structure sédimentaire / lamine / varve 1 taux de sédimentation / envasement 1 érosion / courant de turbidité / vidange / composition minéralogique 1 diffraction X 1 géotechnique /

ABSTRACT

Chambon's dam, on the river Romanche (French Alps), was completed in 1935. Since this date, sediments have been accumulating in the reservoir. After 45 years, they have reached 18 meters behind the dam. When the reservoir was emptied in 1981, it became possible to study these deposits. with the following aims :

- to explain how they formed by looking at the sedimentary structures, granulometrical and mineralogical analysis ;
- to study the efficiency of the emptying as means of preventing the silting up of the reservoir ;
- to characterize the geotechnical properties of the sediments and in particular, their ability to settle.

KEYWORDS

France / Alps / Romanche / artificial lake / lacustrine sedimentation / sedimentary structures / laminated sediment 1 varve / sedimentation rate / silting up / erosion / turbidity current / emptying 1 mineralogical composition / X-ray diffraction analysis / geotechnic /